

**Belebungsbecken in Abwasserbehandlungsanlagen - In-Situ-
Untersuchung des Betonangriffs und Folgerungen für die
Bauwerksdichtigkeit**

**Sachstandsbericht zum Abschluß der finanziellen Förderung des
Forschungsvorhabens**

Bericht erstattet von

**Dipl. Min. F. Schmidt
Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy
Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann
Dipl.-Ing. P. Onken
cand. Biotech. D. Wagner**

**Das Forschungsvorhaben wurde vom Niedersächsischen Minister für Wissenschaft
und Kunst aus Mitteln des Zahlenlottos gefördert.**

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung	2
2.	Einleitung	3
3.	Charakterisierung des Abwassers im Hinblick auf den Baustoff Beton	4
4.	Verwendeter Beton	4
5.	Probekörper	7
5.1.	Probekörper mit eingepprägten Rissen	7
5.2.	Probewände und Beckenwände	11
6.	Bisherige Untersuchungsergebnisse	12
6.1.	Änderungen des Phasenbestandes	12
6.1.1.	Untersuchungen mit Hilfe der Röntgenpulverdiffraktometrie	12
6.1.2.	Untersuchungen mit dem Verfahren der Differentialthermoanalyse/gravimetrie	13
6.2.	Untersuchungen der Porenradienverteilung	14
6.3.	Untersuchung auf einen lösenden Angriff durch mikroskopische Betrachtung der Betonoberfläche	15
6.4.	Bauwerksverfahren zur Permeabilität und Wasserabsorption	15
6.4.1.	Kapillares Wassersaugen (ISAT-Verfahren)	16
6.4.2.	Gaspermeabilität der oberflächennahen Betonschicht	17
6.5.	Chemische Analysen	19
6.6.	Untersuchung der Stahlbewehrung auf Korrosion	20
6.7.	Mikrobielle Besiedlung des Betons	22
6.8.	Makroskopische Veränderungen der Proben	27
6.9.	Abwasserpenetration im ungerissenen Beton	28
7.	Diskussion	29
8.	Literatur	30
9.	Anhang	32

1. ZUSAMMENFASSUNG

In den Jahren 1989 und 1990 wurde die Abwasservorbehandlungsanlage Braunschweig-Watenbüttel stark erweitert. Durch den Ammoniumgehalt des Abwassers ist im Bereich der Anlage mit einem lösenden Angriff auf Beton zu rechnen. Die Dauerhaftigkeit und, damit zusammenhängend, die Dichtigkeit des neu eingebauten Betons wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersucht. Die Ergebnisse stützen sich im wesentlichen auf die Untersuchung von Stahlbetonproben mit eingepprägten Trennrissen, die nach Beginn des routinemäßigen Betriebes in eines der neu erstellten Belebungsbecken eingehängt wurden. Desweiteren wurden zwei Probewände erstellt, die in ihren Abmessungen den Beckenwänden vergleichbar sind. Diese Wände werden atmosphärisch bewittert und als Referenzproben benutzt. Außerdem wurden auch Untersuchungen der Beckenwände selbst durchgeführt.

Folgende Materialparameter wurden untersucht: Änderungen des Phasenbestandes, der Porenradienverteilung, der Oberflächenstruktur, des kapillaren Wassersaugens, der Gaspermeabilität der oberflächennahen Betonschicht, der chemischen Zusammensetzung des Betons in Bezug auf Chlorid und Gesamt-Stickstoff, des Korrosionszustandes der Bewehrung und die Abwasserpenetration des Beton. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrobiologie der TU Braunschweig wurde die mikrobielle Besiedlung der Betonproben untersucht.

Anzeichen für einen lösenden Angriff konnten bislang nicht beobachtet werden. Messungen der Gaspermeabilität der Stahlbetonproben mit eingepprägten Trennrissen zeigen, daß die Permeabilität des Betons seit dem ersten Beaufschlagen abgenommen hat. Eine Gefährdung für die Dichtigkeit des Betons ist damit nicht zu erkennen. Auch die Untersuchungen zur mikrobiellen Besiedlung lassen zur Zeit keine Gefährdung des Betons erwarten. Der Beton der neu erstellten Bauwerke verhält sich in Bezug auf eine mikrobielle Besiedlung durch beton-schädliche Mikroorganismen wesentlich günstiger als der Beton der älteren Belebungsbecken der Anlage. Die Untersuchung des Korrosionszustandes der Bewehrung in gerissenen Bereichen zeigt nach ca. 17-monatiger Einlagerungsdauer folgende Ergebnisse: Proben mit einer Betonüberdeckung von 2 cm zeigten ab einer maximalen Rißbreite von 0,2 mm im Rißbereich stärkere Korrosionserscheinungen (Narben). Bei einer Betondeckung von 5 cm traten ab einer maximalen Rißbreite von 0,6 mm Narben auf, aber auch bei der kleinsten eingestellten maximalen Rißbreite von 0,2 mm trat noch Flugrost im Rißbereich auf.

Die Vermeidung von Rissen bzw. die Verkleinerung der Rißbreiten und das nachträgliche Verschließen aufgetretener Risse hat für die Dauerhaftigkeit solcher Bauwerke also eine große Bedeutung, auch wenn die zukünftige Entwicklung des Korrosionsprozesses an diesen Proben noch weiter untersucht werden muß.

2. EINLEITUNG

Im Zuge der Erweiterung der Abwasservorbehandlungsanlage Braunschweig-Watenbüttel soll die Dauerhaftigkeit und, damit zusammenhängend, die Dichtigkeit des neu eingebauten Betons über einen Zeitraum von 5 Jahren untersucht und verfolgt werden. Dieser Sachstandsbericht erfolgt nach Ablauf der beantragten Förderungsdauer von 2,5 Jahren. Nach der gesamten Untersuchungsdauer von 5 Jahren erfolgt ein abschließender Bericht.

In den Jahren 1989 und 1990 wurde die Abwasservorbehandlungsanlage durch 4 neue Belebungsbecken, 2 Nachklärbecken und mehrere kleinere Betonbauwerke erweitert. Die bestehenden Belebungsbecken der Anlage zeigten zu diesem Zeitpunkt stärkere Schäden. Baubegleitend wurden mehrere Stahlbetonkörper mit eingeprägten Rissen verschiedener, kontrollierter Rißbreite hergestellt und in eines der neuen Belebungsbecken der Anlage eingehängt. Das Forschungsprojekt stützt sich im wesentlichen auf die Untersuchung dieser Probekörper. Die Proben wurden bislang dreimal im Abstand von ca. 5 Monaten aus dem Becken entnommen. Folgende Materialparameter wurden untersucht: Veränderungen des Phasenbestandes, Veränderungen der Porenradienverteilung, lösender Angriff auf die Betonoberfläche, kapillares Wassersaugen, Gaspermeabilität der oberflächennahen Betonschicht, Chlorid- und Gesamtstickstoffgehalt in verschiedenen Schichten der Proben, Korrosion der Bewehrung im Rißbereich, Mikrobielle Besiedlung des Betons, Makroskopische Veränderungen der Proben und Abwassereindringtiefe.

Weiterhin wurden 2 Betonwände hergestellt, die in ihren Abmessungen den Beckenwänden vergleichbar sind. Diese Betonwände werden atmosphärisch bewittert um Vergleichsdaten zu dem beaufschlagten Beton in der Kläranlage zu gewinnen.

Vor dem Befüllen der Belebungsbecken wurde die Druckfestigkeit, das Wassersaugen und die Gaspermeabilität des Betons am Bauwerk überprüft. Diese Messungen werden bei der Reinigung der Becken wiederholt.

3. CHARAKTERISIERUNG DES ABWASSERS IM HINBLICK AUF DEN BAUSTOFF BETON

Zur Bestimmung des zu erwartenden Betonangriffs wurden am 23.01.1989 an verschiedenen Stellen der Braunschweiger Kläranlage Wasserproben entnommen und von der Amtlichen Materialprüfanstalt für das Bauwesen in Braunschweig analysiert. Die entsprechenden Analysen stehen im Anhang in der Tabelle 4. Die betonschädlichen Stoffe Magnesium, Sulfat und Chlorid liegen in unschädlichen Konzentrationen vor. Kalklösende Kohlensäure fehlt, der pH-Wert liegt im neutralen bis schwach alkalischen Bereich. Sulfide sind ebenfalls nur in Spuren vorhanden. Von Bedeutung ist aber der Ammoniumgehalt der Proben. Nach DIN 4030 /N1/ sind Wässer mit mehr als 60 mg/l NH_4^+ als sehr stark betonangreifend einzustufen. Alle drei Proben überschreiten diesen Grenzwert. Diese Analyse stand im Widerspruch zu Analysen des Abwasserlabors der Kläranlage. Dort wurden im Mittel wesentlich niedrigere Ammoniumgehalte, sowohl im Zulauf, als auch im Ablauf der Anlage, gemessen. Tabelle 5 im Anhang gibt einen Überblick über den Ammoniumgehalt der Abwässer des Jahres 1988 nach den Analysen des Kläranlagenlabors. Aus diesem Grund wurden am 01.02.1989 noch einmal 10 Abwasserproben aus der Kläranlage entnommen und speziell auf den Stickstoff- bzw. Ammoniumgehalt untersucht. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Tabelle 6 im Anhang zusammengefaßt. Nach diesen Analysen werden die höchsten Konzentrationen an Ammonium im Zulauf der Kläranlage erreicht. In den Belebungsbecken und den Nachklärbecken wird der Grenzwert der DIN 4030 für sehr starken chemischen Angriff von 60 mg/l NH_4 nicht erreicht, allerdings ist mit einem starken Angriff zu rechnen (Grenzwert: 30 mg/l NH_4).

4. VERWENDETER BETON

Alle Probekörper wurden auf der Baustelle mit dem jeweils dort eingebrachten Beton hergestellt und unter Praxisbedingungen verdichtet und nachbehandelt.

Bei dem verwendeten Beton handelt es sich wegen dem zu erwartenden starken chemischen Angriff um einen wasserundurchlässigen Beton nach DIN 1048. Zunächst wurde mit einem Wasserzementwert von 0,47, ab Februar 1990 mit einem Wasserzementwert von 0,45 gearbeitet. Der Beton hat die Festigkeitsklasse B 35. In der Regel wurde Zuschlag der Sieblinie A/B 32, bei enger Bewehrung A/B 16 benutzt. Die verwendeten Betonrezepturen sind im Anhang in den Tabel-

len 7-9 genauer beschrieben. Die Konsistenz KR wurde unter Verwendung der Verflüssiger bzw. Fließmittel Woermann BV 25, FM 25 und FM 26 eingestellt.

Auswahl des Zementes

In der Literatur wird berichtet, daß Hochofenzement allgemein eine große Dichtigkeit und damit verbunden auch eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen verschiedene chemische Stoffe besitzt (abgesehen von der Carbonatisierung). Betone aus Hochofenzementen zeigen oft eine sehr feine Porenstruktur, eine verstärkte Sorption negativer Ionen an den Porenwänden aufgrund SiO_2 reicherer CSH-Phasen und eine verlangsamte Gegendiffusion von OH^- -Ionen aufgrund der niedrigeren OH^- Konzentration in der Porenlösung. Vor allem die gute Beständigkeit von Betonen mit hochgeschlacktem Hochofenzement in sulfathaltigen Lösungen ist hervorzuheben, auch wenn dies in dem hier vorliegenden Milieu keine Rolle spielt. Weiterhin ist bekannt, daß der Chloriddiffusionswiderstand von Hochofenzementbetonen mit großem Hüttensandgehalt wesentlich größer ist als der reiner Portlandzementbetone, ebenso der elektrolytische Widerstand, der für den Korrosionswiderstand der Bewehrung ebenfalls von großer Bedeutung ist /1,2,3/. Für den Chloriddiffusionswiderstand ist die Adsorption der negativen Chloridionen an den Porenwänden von großer Bedeutung. Sie führt zum Abbau der Konzentrationsgradienten und damit zur Verlangsamung der Diffusion /4/.

Im Falle eines lösenden Angriff muß die festigkeitsbildende Struktur des Bindemittels, die CSH-Phasen, zerstört werden. Austauschfähige Salze wirken auf alle calciumhaltigen Komponenten des Bindemittels ein, sicher zuerst auf das Calciumhydroxid, dann auch auf die CSH-Phasen. Nach Biczok /5/ werden Traß- und Hochofenzementbetone oft schneller durch austauschfähige Salze angegriffen als reine Portlandzementbetone. Er erklärt dies über die schnellere hydrolytische Zersetzung der CSH-Phasen aufgrund der geringeren Pufferwirkung des vorhandenen Calciumhydroxids. Dies steht in Übereinstimmung mit der Beobachtung, daß Betone mit Puzzolanen bei Säureangriff oftmals keine besseren Ergebnisse zeigen als Betone ohne Puzzolane.

In der Betonporenlösung ist Calciumhydroxid normalerweise nur schwer löslich. Durch von außen eindringende saure Lösungen oder austauschfähige Salze kann die gelöste Menge stark ansteigen, ohne daß dadurch sofort die CSH-Phasen zerstört werden. In einem solchen Fall wird natürlich der Porenraum stark vergrößert, so daß Transportprozesse schneller voranschreiten können. Daher

kann eine größere Calciumhydroxidkonzentration in einem Beton bei lösendem Angriff auch nachteilig sein. Diese Vergrößerung des Porenraumes wird sich bei solchen Betonen am stärksten bemerkbar machen, die von vorneherein sehr dicht sind. Bei relativ durchlässigen Betonen spielt die Vergrößerung des Porenraumes durch den lösenden Angriff keine so große Rolle für die Transportgeschwindigkeit der Schadstoffe.

Diese beiden Eigenschaften des Calciumhydroxids im Falle eines lösenden Angriffs - Wirkung als Puffer, der den pH-Wert über 12 hält solange noch Calciumhydroxid vorhanden ist, aber auch schnelle Vergrößerung des Porenraums durch die große Menge schnell weggelösten Materials - wirken entgegengesetzt. Welcher Prozess im konkreten Fall die Eigenschaften eines Betons bei einem lösenden Angriff bestimmt ist schwer vorherzusagen. Wir konnten jedenfalls in eigenen Versuchen im Falle eines lösenden Angriffs keinen signifikanten Unterschied in den Abtragungsraten verschiedener Betone mit einem Wasserzementwert von 0,47, hergestellt aus hochgeschlacktem Hochofenzement bzw. Portlandzement und verschiedenen Zusatzstoffen, feststellen /6,7/.

Für flüssigkeitsdichte Behälter spielt die Bildung von Temperaturrissen durch Zwangsspannungen im jungen Betonalter eine große Rolle. Diese Risse haben wegen dem möglichen beschleunigten Eindringen von Schadstoffen und der möglichen Freilegung von Bewehrung eine große Bedeutung für die Dauerhaftigkeit eines Betonbauwerkes. Die Gefahr solcher Risse kann durch die Verwendung eines langsam erhärtenden Zements niedriger Hydratationswärme und niedriger Festigkeit vermindert werden (Zusätze L NW). Diese Zemente sind in der Regel Hochofenzemente, nur in Süddeutschland werden entsprechende Portlandzemente hergestellt.

Aus diesen Gründen wurde ein Hochofenzement HOZ 35 L HS NW NA eingesetzt. Die Verwendung von HS-Zement war eine Vorgabe des Bauherren.

5. PROBEKÖRPER

5.1. Probekörper mit eingepprägten Rissen

Auf der Baustelle wurden insgesamt 32 Probekörper aus Stahlbeton hergestellt. 16 Proben wurden in den Abmessungen 20x20x50 cm und 16 Proben in den Abmessungen 32x20x50 cm erstellt. Die kleineren Proben besitzen eine Betondeckung von 2 cm, die größeren eine Betondeckung von 5 cm. Die Bewehrungsführung der verschiedenen Probenarten ist in Abbildung 9 im Anhang dargestellt. Jeweils 4 Probekörper mit kleiner und 4 Proben mit großer Betondeckung wurden am 9.2.90, am 7.3.90, am 28.3.90 und am 16.5.90 in leicht saugender Holzschalung betoniert. Die Probekörper wurden mit einer Rüttelflasche verdichtet und zwischen 5 und 7 Tagen mit Folie abgedeckt in Schalung belassen. Danach wurden die Probekörper zum Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig verbracht. Über die Betonagen vom 7.3., 28.3. und 16.5. liegen die Meßwerte der Frischbetonprüfung, der Würfeldruckfestigkeit und der Wassereindringtiefe vor. Die Ergebnisse sind im Anhang in Tabelle 10 zusammengefaßt.

In die Mitte der Proben wurde ein Edelstahl-Vierkantrohr, WN 1.4571 bzw. 1.4401 einbetoniert, in das nach Abschluß der Nachbehandlung 2 Keile, ebenfalls aus Edelstahl, WN 1.4301, eingesetzt wurden. Mit Hilfe dieser Keile wurden in einer Prüfmaschine direkt im Anschluß an die Nachbehandlung Trennrisse in die Proben eingepragt. Die eine Hälfte der Proben sollte mit maximalen Rißbreiten von 0,1 - 0,2 mm, die andere Hälfte mit Rißbreiten von 0,5 - 0,6 mm versehen werden. Dies konnte nicht ganz erreicht werden. Die Spannweite der tatsächlichen maximalen Rißöffnungen der für die Versuche verwendeten Proben sind im Anhang in Tabelle 11 aufgelistet. Die Proben mit kleiner Rißbreite zeigen eine durchschnittliche maximale Rißöffnung von 0,22 mm. Die Spannweite reicht von 0,15 bis 0,3 mm. Die Proben mit großer Rißbreite zeigen eine durchschnittliche maximale Rißöffnung von 0,65 mm. Die Spannweite reicht von 0,4 mm bis zu 1,0 mm. Daneben sind immer auch Risse mit kleinerer Öffnung vorhanden. Abbildung 1 auf der nächsten Seite zeigt eine Schemazeichnung eines Probekörpers mit kleiner Betondeckung und typischem Rissbild. Die Proben wurden mit ihrem Betonagedatum und einer fortlaufenden Nummer durch Einprägung in einen der Edelstahlkeile gekennzeichnet.

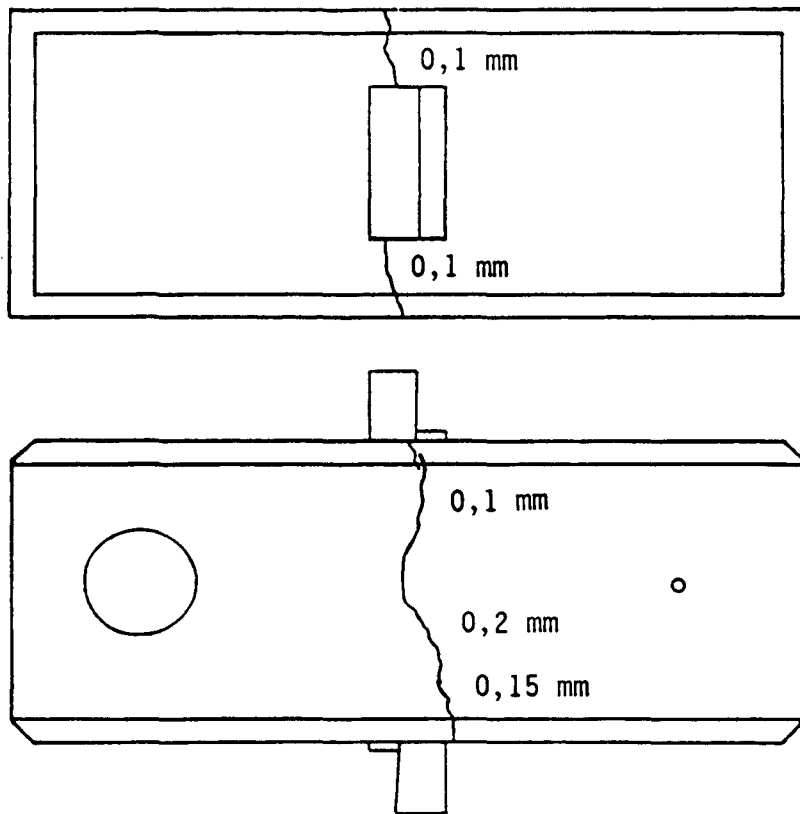


Abbildung 1: Probekörper mit 2 cm Betondeckung und typischem Rissverlauf. Eingezeichnet sind auch die Prüfstellen für das ISAT-Verfahren, sowie die Gaspermeabilität. Maße der Probe: 50 x 20 x 20 cm.

Die neuen Belebungsbecken der Abwasserbehandlungsanlage Braunschweig wurden im November 1990 befüllt. Nach dem Übergang in den routinemäßigen Betrieb wurden insgesamt 24 der hergestellten Probekörper in das Belebungsbecken 5 eingehängt. Abbildung 2 auf der nächsten Seite zeigt eine Schemaskizze dieses Belebungsbeckens mit den eingezeichneten Probenpositionen.

Der Rotor a ist normalerweise außer Betrieb, hier ist das Sauerstoffangebot im Becken am geringsten. Hinter diesem Rotor liegt die Probenposition 1. Zunächst war geplant, die Rotoren d und f ständig in Betrieb zu halten. Die Rotoren b, c und e sollten bei Bedarf zugeschaltet werden. Dieses Konzept wurde jedoch nicht aufrechterhalten. Die entsprechenden Probenpositionen 2 - 6 können also nicht nach verschiedenen Sauerstoffgehalten differenziert werden. Alle diese Probenpositionen zeigen jedoch einen wesentlich größeren Sauerstoffgehalt als die Probenposition 1.

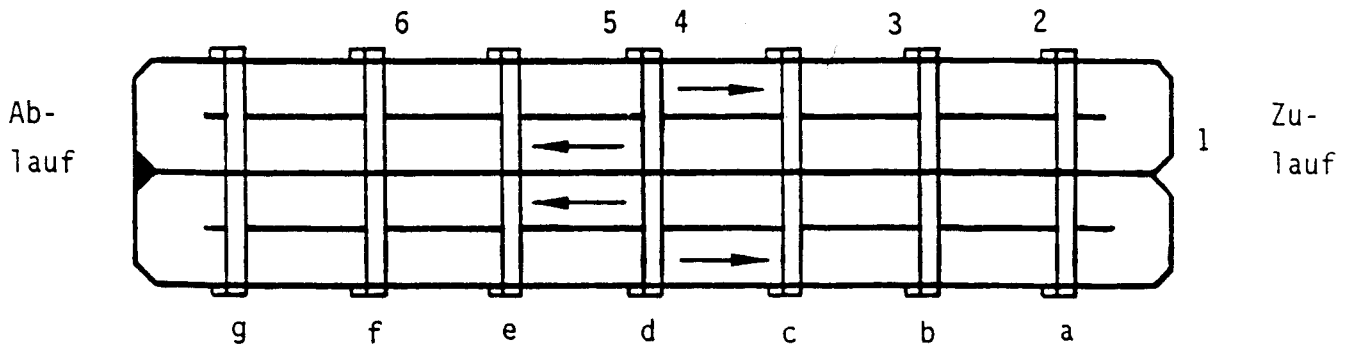


Abbildung 2: Skizze der Belebungsbecken 5 und 6 der Abwasserbehandlungsanlage Braunschweig-Watenbüttel. Eingezeichnet sind die Rotoren (Buchstaben) sowie die Lage der Probenpositionen (Nummern) in Becken 5.

Die Proben der Positionen 2-5 wurden am 3.4. und am 4.4.91 eingehängt, die Proben der Position 1 am 5.5.91. An jeder Probenposition wurden 4 Proben in die Becken eingelagert. Es wurde jeweils eine Probe mit kleiner Betondeckung und großer Rißbreite, eine Probe mit kleiner Betondeckung und kleiner Rißbreite, eine Probe mit großer Betondeckung und kleiner Rißbreite und eine Probe mit großer Betondeckung und großer Rißbreite eingelagert. Die Zuordnung der Proben zu den einzelnen Probenpositionen, sowie ihre Betondeckung und maximale Rißbreite können ebenfalls aus Tabelle 11 im Anhang entnommen werden. Die Proben wurden in der Lage einbaut, in der sie betoniert wurden, also mit der während der Betonage freien Oberfläche nach oben. Die Körper wurden mit Hilfe zweier Kunststoffseile so tief in die Becken heruntergelassen, daß sie zu etwa $\frac{3}{4}$ mit Wasser bedeckt waren. Diese Einlagerungsart wurde gewählt da in der Wasserwechselzone oft die größten Schäden an den Betonbauwerken entstehen. Aufgrund von geänderten Wasserständen wurden die Proben jedoch zeitweilig auch tiefer eingetaucht. Die Seile wurden auf die Außenseite der Becken geführt und dort mit Klemmen, Edelstahl-Ringschrauben und Schwerlastdübeln befestigt. Abbildung 3 auf der nächsten Seite zeigt eine Schemaskizze der eingelagerten Proben. Abbildung 4 zeigt die Probekörper kurz nach dem Herausnehmen aus dem Becken und dem Säubern während der ersten Untersuchungsperiode.

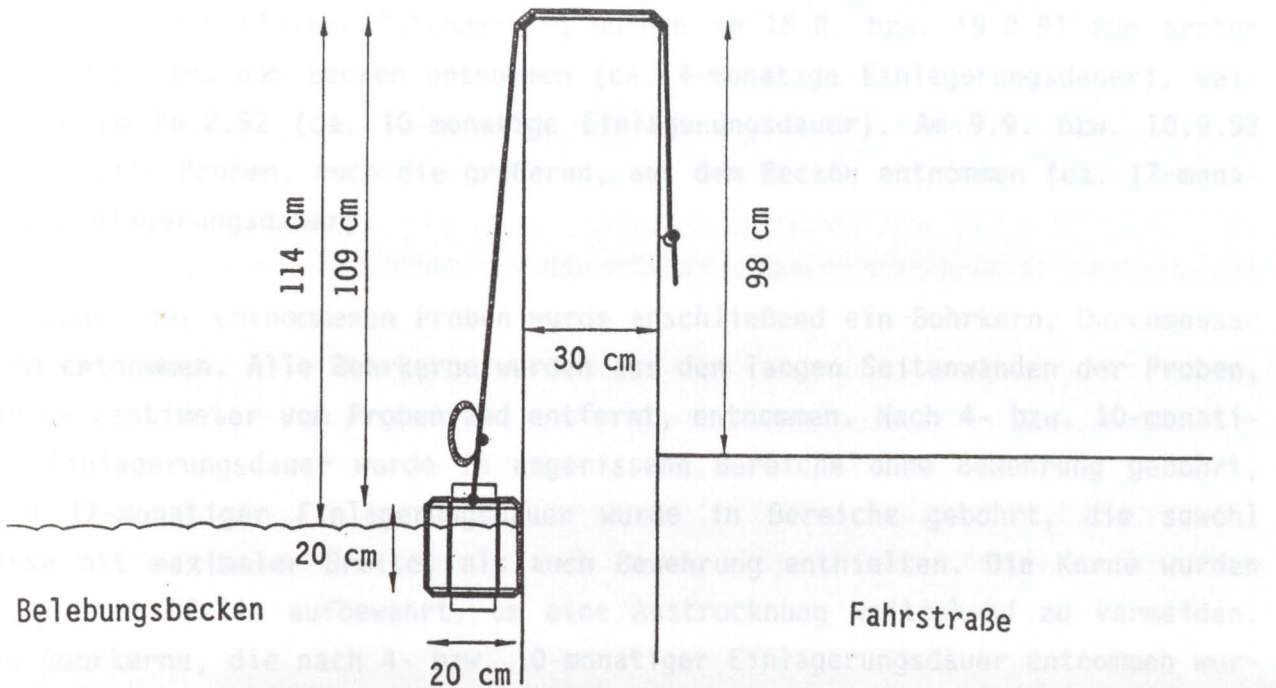


Abbildung 3: Schemazeichnung der eingehängten Stahlbetonproben mit eingepprägten Trennrissen.



Abbildung 4: Zur Untersuchung aus dem Becken entnommene, gesäuberte Proben, im August 1991. Deutlich zu erkennen ist eine Schwarzfärbung der Proben direkt nach der Entnahme, die innerhalb weniger Minuten verblaßt (Erklärung siehe Kap. 6.8).

Die Proben mit kleiner Betondeckung wurden am 16.8. bzw. 19.8.91 zum ersten Mal wieder aus dem Becken entnommen (ca. 4-monatige Einlagerungsdauer), weiterhin am 26.2.92 (ca. 10-monatige Einlagerungsdauer). Am 9.9. bzw. 10.9.92 wurden alle Proben, auch die größeren, aus dem Becken entnommen (ca. 17-monatige Einlagerungsdauer).

Aus jeder der entnommenen Proben wurde anschließend ein Bohrkern, Durchmesser 5 cm entnommen. Alle Bohrkern wurden aus den langen Seitenwänden der Proben, einige Zentimeter vom Probenrand entfernt, entnommen. Nach 4- bzw. 10-monatiger Einlagerungsdauer wurde in ungerissene Bereiche ohne Bewehrung gebohrt, nach 17-monatiger Einlagerungsdauer wurde in Bereiche gebohrt, die sowohl Risse mit maximaler Breite, als auch Bewehrung enthielten. Die Kerne wurden in Kunststoffolie aufbewahrt, um eine Austrocknung weitgehend zu vermeiden. Die Bohrkern, die nach 4- bzw. 10-monatiger Einlagerungsdauer entnommen wurden, wurden zunächst, möglichst bald nach ihrer Entnahme, in einer Prüfmaschine gespalten um frische Bruchflächen zu erzeugen. Die Kerne, die nach ca. 17-monatiger Beaufschlagung entnommen wurden, wurden zunächst mit Hilfe von Hammer und Meißel zerlegt um die Bewehrung freizulegen. Alle weiteren Laboruntersuchungen wurden an diesen Bohrkernen durchgeführt.

Direkt an den herausgenommenen Körpern wurde die Durchlässigkeit der oberflächennahen Betonschicht und die kapillare Wasseraufnahme nach dem ISAT-Verfahren gemessen. Nach Verschließen der Bohrlöcher mit einem Reparaturmörtel wurden die Proben dann wieder in das Becken eingehängt. Es ist geplant, die Proben solange wie möglich in dem Becken einzulagern, um die Veränderungen langfristig beobachten zu können.

5.2. Probewände und Beckenwände

Auf dem Baustellengelände wurden am 25.5.89 (Wand I) und am 31.5.89 (Wand II) zwei Probewände erstellt. Die Betonrezeptur der Wand I entspricht etwa der tatsächlich verbauten Rezeptur. In der Betonrezeptur von Wand II wurden 50 kg Zement durch Flugasche ersetzt. Diese Rezeptur stellte sich jedoch bezüglich der Wassereindringtiefe als ungünstiger heraus. Die Wände haben eine Höhe von 3,50 m, eine Breite von 2,30 m und eine Dicke von 0,3 m und wurden 5 Tage in Schalung belassen. Die Betondeckung beträgt bei diesen Wänden 5 cm.

Die Wandflächen wurden Nord/Süd orientiert. Nach Beendigung der Bautätigkeiten an der Kläranlage wurden die beiden Wände ebenfalls Nord/Süd orientiert auf dem Gelände des Institutes für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz aufgestellt. Die Wände werden atmosphärisch bewittert, ihr kapillares Wasser-saugen, ihre Gaspermeabilität, ihre Porenradienverteilung und ihre Phasenzusammensetzung wird langfristig beobachtet. Angaben zur Druckfestigkeit und zur Wassereindringtiefe der Wände sind in Tabelle 10 im Anhang zusammengefasst.

Die Beckenwände der neu errichteten Belebungsbecken 3-6 wurden von der Amtlichen Materialprüfanstalt für das Bauwesen in Braunschweig auf ihre Druckfestigkeit, ihre Gaspermeabilität und ihr kapillares Wassersaugen untersucht. Die entsprechenden Daten sind in den Berichten Nr. 1112/53 0 und 1295/163 9 dokumentiert.

Diese Arbeiten können nur bei entleerten Becken durchgeführt werden. Die entsprechenden Messwerte werden langfristig beobachtet.

6. BISHERIGE UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

6.1. Änderungen des Phasenbestandes

6.1.1. Untersuchungen mit Hilfe der Röntgenpulverdiffraktometrie

Es wurden Röntgenphasenanalysen von Pulverproben der entnommenen Bohrkern nach ca. 4- bzw. 17-monatiger Einlagerungsdauer durchgeführt. Dabei wurden mehrere Proben aus 0-1 cm Tiefe und aus 5-8,5 cm Tiefe analysiert. Es wurden sowohl Betonproben aus sauerstoffreichen als auch Proben aus sauerstoffarmen Beckenbereichen untersucht.

Alle Proben zeigten starke Reflexe von Quarz und Feldspat. In einigen Proben sind auch Reflexe eines Glimmers, eventuell Biotit, zu erkennen. Alle diese Peaks stammen von den Zuschlägen. Portlandit und Calcit sind andeutungsweise zu erkennen, Portlandit vor allem bei den Proben aus größerer Tiefe. Die niedrigen Portlanditgehalte sind für einen Beton mit einem hochgeschlackten

Hochofenzement normal. Der Calcit entsteht durch die Carbonatisierung der Proben bzw. Bohrkerne bei Lagerung an der Luft. Alle Proben konnten vor ihrer Einlagerung in das Belebungsbecken an der freien Witterung carbonatisieren. Phasenneubildungen durch den Einfluß des Abwassers konnten bisher nicht eindeutig nachgewiesen werden. Die Röntgenphasenanalyse der Proben aus dem Belebungsbecken unterscheidet sich nicht relevant von der Analyse einer Referenzprobe, die der freien Witterung ausgesetzt war.

Da Phasenumbildungen wenn, dann vor allem im Zementstein zu erwarten sind, wäre es sehr vorteilhaft wenn man die Zuschläge aus den Betonproben nachträglich weitgehend entfernen könnte. Vor allem die niedrigsymmetrischen Feldspäte erzeugen eine Unmenge an Röntgenreflexen, die die Phasenanalyse von Betonproben sehr erschweren. Deshalb wurden Versuche zur Abtrennung der Zuschläge über das Verfahren der Magnetscheidung durchgeführt. Diese Experimente konnten im Mineralogischen Institut der Universität Marburg (Prof. Hoffer) durchgeführt werden. Die Versuche zeigten zwar, daß die Zementsteinphasen durchweg paramagnetisch sind. Damit ist prinzipiell eine Abtrennung des diamagnetischen Quarzes möglich. Eine Abtrennung der ebenfalls paramagnetischen Feldspäte, Glimmer usw. ist jedoch nicht möglich. Eine wesentliche Aufkonzentration des Zementsteines in Betonproben war nicht zu erreichen.

6.1.2. Untersuchungen mit dem Verfahren der Differentialthermoanalyse/gravimetrie

Jeweils ein Bohrkern aus einem an freier Witterung gelagerten Referenzkörper, einem Probekörper der in einer sauerstoffreichen Zone und einem Probekörper der in einer sauerstoffarmen Zone des Belebungsbeckens eingelagert war wurde mit Hilfe der Differentialthermoanalyse/gravimetrie nach ca. 17-monatiger Einlagerungsdauer untersucht. Aus den Bohrkernen wurden Pulverproben aus 0-1 cm Tiefe und 5-6 cm Tiefe entnommen. Alle Analysen wurden mit einem Gerät STA 409 der Firma Netzsch durchgeführt. Abbildung 10 im Anhang zeigt die DTG Diagramme der Proben. Deutlich erkennbar ist die Calciumhydroxidersetzung zwischen 450 und 500 °C. Der Calciumhydroxidgehalt aller Betone ist relativ klein. Dies ist bei Verwendung eines Zementes HOZ-HS zu erwarten. Signifikante Unterschiede im Calciumhydroxidgehalt der Proben sind nicht zu erkennen, weder bei Proben aus 0-1 cm Tiefe, noch bei Proben aus 5-6 cm Tiefe. Das Calciumhydroxid wird im Falle eines lösenden Angriffes in der Regel als

erste Phase weggelöst. Ein solcher Prozess ist in diesem Falle nicht zu erkennen. Die "Delle" zwischen 280 und 450 °C im Falle der Probe 9-2-90/6 (sauerstoffarm eingelagert) aus 5-6 cm Tiefe ist darauf zurückzuführen, daß ein Abstandshalter aus Kunststoff angebohrt wurde. Die Zersetzungsreaktion des Kunststoffes macht sich in diesem Fall bemerkbar. Dieser Peak führt zu einer teilweisen Überdeckung des Calciumhydroxidpeaks.

6.2. Untersuchungen der Porenradienverteilung

Parallel zur Untersuchung des Phasenbestandes wurden Analysen der Porenradienverteilung mit einem Quecksilberdruckporosimeter durchgeführt. Auch diese Analysen wurden nach ca. 4- bzw. 17-monatiger Einlagerungsdauer erstellt. Alle Analysen wurden mit einem Carlo Erba Porosimeter 2000 durchgeführt. Aus einigen Probekörpern mit eingeprägten Trennrissen wurden Proben aus 0-1 cm und 5-6 cm Tiefe, sowohl aus sauerstoffreichen und sauerstoffarmen Beckenbereichen untersucht. Daneben wurde auch Material aus einer Referenzprobe untersucht, die der freien Witterung ausgesetzt war. Die Porenradienverteilungen sind im Anhang in Abbildung 11-14 dargestellt. Bei allen Proben aus 0-1 cm Tiefe ist eine weitgehende "Einebnung" der Porenradienverteilung, die auf die Carbonatisierung der Betonrandschicht zurückzuführen ist, zu beobachten. Die große Porosität zwischen 0,1 und 1,0 Mikrometer (Verbundzonenporosität) im Falle der Proben 9.2.90-2 bzw. 9.2.90-1 aus 5-6 cm Tiefe und 4-monatiger Einlagerungsdauer ist untypisch für Betone mit Hochofenzement. Sie ist aber sicherlich nicht auf einen chemischen Angriff zurückzuführen, da etwas ähnliches bei den Proben nach 17-monatiger Einlagerungsdauer nicht beobachtet werden konnte und ein vergleichbarer Verlauf der Porenradienverteilung auch bei der Referenzprobe beobachtet werden konnte. Eventuell wurde hier einer der eingeprägten Risse unbemerkt miterfaßt. Anzeichen für einen lösenden Angriff sind also nicht zu beobachten.

Die Analysen von Proben der Wand I zeigen eine etwas geringere Porosität im Bereich 0,01-0,03 Mikrometer. Die messbaren kumulativen Porenvolumen sind vergleichbar mit den Werten der Stahlbetonproben mit eingeprägten Trennrissen. Der Flugaschebeton der Probewand II zeigt deutlich kleinere kumulative Volumen. In den carbonatisierten Probenbereichen konnten keine Unterschiede zwischen den Wandbetonen und den Probekörpern mit Trennriß festgestellt werden.

6.3. Untersuchung auf einen lösenden Angriff durch mikroskopische Betrachtung der Betonoberfläche

Ein lösender Angriff wirkt in der Regel auf das Bindemittel eines Betons, nicht auf die Zuschläge. Durch das Herauslösen des Bindemittels entstehen Stufen zwischen den Zuschlägen und dem Zementstein. Diese Stufen können am besten unter dem Mikroskop erkannt und auch vermessen werden. Die Oberflächen aller aus den eingelagerten Betonproben entnommenen Bohrkernen wurden nach ca. 17-monatiger Einlagerungsdauer unter dem Mikroskop untersucht. Dabei konnten keinerlei signifikante Stufen zwischen Zementstein und Zuschlägen beobachtet werden.

6.4. Bauwerksverfahren zur Permeabilität und Wasserabsorption

Die Gasdurchlässigkeit und die Wasseraufnahme der Probekörper wurde mit Hilfe zweier Bauwerksverfahren untersucht. Diese Messungen wurden an den Probekörpern mit eingeprägten Rissen vor der Einlagerung in das Belebungsbecken und nach jeder Entnahme durchgeführt. Daneben wurden auch Messungen an den Probewänden und den Wänden des Belebungsbeckens im trockenen Zustand durchgeführt. Das ISAT Verfahren (Initial Surface Absorption Test) bestimmt die Wasseraufnahme einer Betonoberfläche. Das Ergebnis ISA (t_s) gibt an, wieviel Milliliter Wasser pro Fläche und Zeit nach der Zeiteinheit t_s von der Betonoberfläche aufgesaugt wird. Ein anderes, am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig entwickeltes Verfahren, mißt die Permeabilität von Stickstoff durch den oberflächennahen Beton bei konstantem Gasstrom. Beide Verfahren ergänzen sich, da verschiedene Betonbereiche von der jeweiligen Messung erfaßt werden. Im einen Fall wird nur die Betonrandzone untersucht, während im anderen Fall die Eigenschaften des Betons einer mehreren Zentimeter dicken Oberflächenschicht das Messergebnis bestimmt. Die Messergebnisse beider Verfahren sind Funktionen der Porosität, der Porenradienverteilung, der Porenstruktur und der Feuchte des Betons. Daher ist zu erwarten, daß lösende oder porenverdichtende Prozesse im Beton durch die Einwirkung des Abwassers mit beiden Verfahren beobachtet werden können. Lösende Prozesse erhöhen die Gaspermeabilität und das Wassersaugen. Eine Erniedrigung der Permeabilität und des Wassersaugens kann durch treibende Prozesse, durch Ablagerungen im Porenraum, die nicht unbedingt treibend wirken müssen oder durch eine fortschreitende Hydratation hervorgerufen werden. Ein

großer Vorteil der beiden Verfahren ist, daß sie direkt am Bauwerk angewandt werden können. Die Meßstellen beider Verfahren befanden sich an einer der langen Seitenwände der Proben, unterhalb der Wasserlinie.

6.4.1. Kapillares Wassersaugen (ISAT-Verfahren)

Mit dem ISAT-Verfahren kann das kapillare Wassersaugen der oberflächennahen Betonschicht gemessen werden. Es ist nach British Standard 1881, Part 5 genormt. Ein Skizze der ISAT Apparatur ist in Abbildung 5 dargestellt.

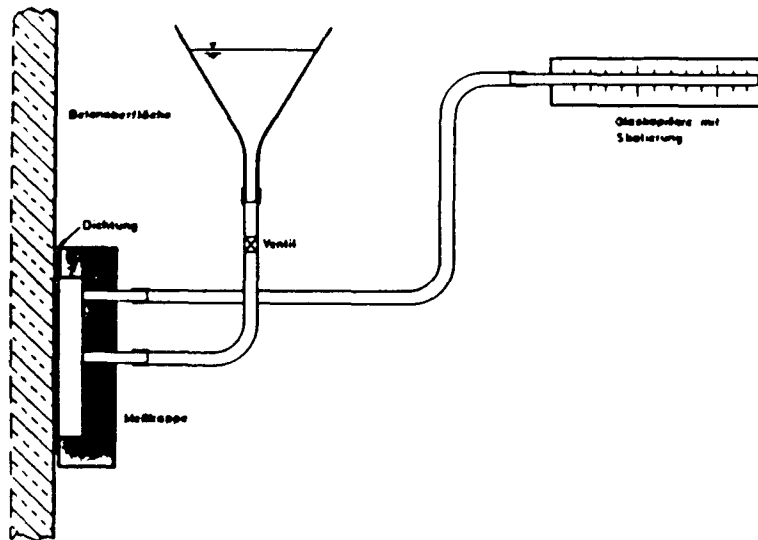


Abbildung 5: Apparatur zur Durchführung von ISAT-Messungen (nach /8/).

Zunächst wird eine mit einer Dichtung versehene Prüfkappe auf der Betonoberfläche angebracht. An diese Prüfkappe ist eine Glaskapillare angeschlossen. Die Prüfkappe und die angeschlossene Glaskapillare werden über ein Wasserreservoir gefüllt. Nach definierten Zeitabschnitten wird das Reservoir von der Prüfkappe durch ein Ventil getrennt. Durch das Wassersaugen der Betonoberfläche wird aus der Glaskapillare Flüssigkeit angesaugt. Dieses Saugen wird in $\text{ml}/(\text{m}^2 \text{ s})$ angegeben. Da die Betonfeuchte den ISAT-Wert stark beeinflusst dürfen die zu messenden Betonoberflächen seit mindestens 2 Tagen nicht

berechnet worden sein. Weitere Informationen zu diesem Verfahren können aus /9/ entnommen werden.

ISAT-Messungen wurden sowohl an den Beckenwänden, als auch an den Probewänden und den Stahlbetonproben mit eingepprägten Rissen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind im Anhang in den Abbildungen 15 - 18 dargestellt. Im Falle der Stahlbetonproben mit Trennrissen wurde die Messung im ungerissenen Probenbereich durchgeführt.

Die ISAT-Messwerte der Stahlbetonproben mit eingepprägten Rissen bleiben über den bis jetzt untersuchten Zeitraum etwa gleich oder fallen leicht ab. Ein generelles Ansteigen der ISAT-Werte innerhalb einer Probenposition, das als Anzeichen für einen lösenden Angriff gedeutet werden könnte, ist nicht erkennbar. Die gemessenen ISAT-Werte liegen im Bereich eines qualitativ hochwertigen Betons und sind vergleichbar mit den entsprechenden Werten der Probewände und der Beckenwände.

6.4.2. Gaspermeabilität der oberflächennahen Betonschicht

Im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem ein Permeabilitätsmaß für die oberflächennahe Betonschicht ermittelt werden kann. Durch Eichmessungen kann dieses Permeabilitätsmaß in den Permeabilitätskoeffizienten k umgerechnet werden. Der prinzipielle Aufbau der Apparatur ist in Abbildung 6 auf der nächsten Seite dargestellt.

Über einen Packer wird Stickstoff in ein Bohrloch eingepresst. Die Tiefe des Bohrlochs und die Lage des Packers kann variabel eingestellt werden, so daß die Dicke der zu untersuchenden Betonschicht an die vorliegende Fragestellung angepasst werden kann. In unseren Messungen betrug die Bohrlochtiefe immer 45 mm und die durch den Packer abgedichtete Bohrlochlänge 35 mm. Das Gas permeiert durch die oberflächennahe Betonschicht und wird in einem Gassammler aufgefangen. Bei stationärem Gasfluß wird entweder der Durchfluß, z.B. über einen Blasenähler, oder der Zeitraum gemessen, der für einen Druckanstieg im Gassammler um 1 mbar benötigt wird.

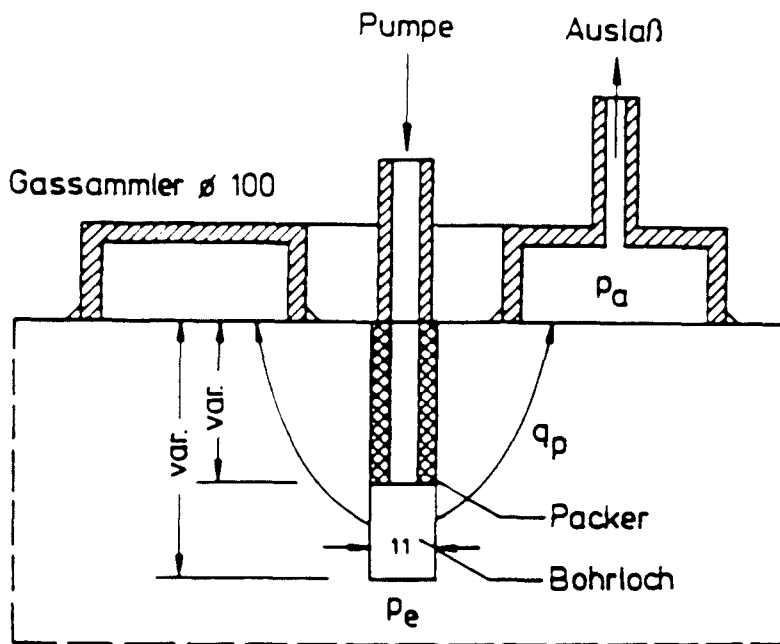


Abbildung 6: Apparatur zur Messung der Gaspermeabilität bei stationärem Gasstrom nach /10/.

Die Messwerte werden nach dem Hagen-Poiseuille-Gesetz ausgewertet. Dabei wird von der Näherung einer eindimensionalen laminaren Strömung eines inerten Gases ausgegangen. Dieses Gesetz lautet /8,11/:

$$Q_p = V / \Delta t = k \cdot A / (l \cdot \eta) \cdot p_e^2 - p_a^2 / (2 \cdot p_m)$$

Dabei ist:	Q_p	Durchflußmenge beim Druck p
	V	Gasvolumen, das die Probe im Zeitintervall Δt durchfließt
	k	spezifischer Permeabilitätskoeffizient
	A	durchströmte Fläche
	l	durchströmte Stoffschichtdicke
	η	Gasviskosität
	p_e	Eingangsdruck des Gases
	p_a	Ausgangsdruck des Gases
	p_m	Druck bei dem das durchströmende Gasvolumen gemessen wird

Da der Quotient A/l bei diesem, wie auch bei anderen Bauwerksverfahren, nicht genau bekannt ist, kann mit dem Verfahren nicht direkt ein Permeabilitätskoeffizient gemessen werden, sondern nur ein Permeabilitätsmaß.

Das verwendete Permeabilitätsmaß ist auf folgende Weise definiert:

$$\text{Permeabilitätsmaß} = (2 \cdot p_m) / ((p_e^2 - p_a^2) \cdot \Delta t) = k \cdot A / (V \cdot l \cdot \eta)$$

Dieses Permeabilitätsmaß ist direkt proportional dem spezifischen Permeabilitätskoeffizienten k , da die Größen A , V , l und η Konstanten sind.

Auch diese Versuche wurden im Falle der Stahlbetonproben mit eingepprägten Trennrissen im ungerissenen Probenbereich durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind im Anhang in den Abbildungen 19 und 20 dargestellt.

Diese Abbildungen zeigen, daß die Gaspermeabilität des Betonrandbereichs während des untersuchten Zeitraumes deutlich abgenommen hat. Der Beton ist also zunehmend dichter geworden. Anzeichen für einen lösenden Angriff sind nicht zu erkennen. Die Absolutwerte der Messungen zeigen einen qualitativ hochwertigen Beton, viele Proben erreichen die untere Grenze des Messbereichs der Apparatur.

6.5. Chemische Analysen

Es wurden chemische Analysen auf Chlorid und Gesamt-Stickstoff an Material aus den in den Belebungsbecken eingehängten Probekörpern nach ca. 17-monatiger Einlagerungsdauer durchgeführt. Wiederum wurde Material aus einer Tiefe von 0-1 cm und 5-6 cm analysiert. Zum Vergleich wurde auch Probenmaterial aus einer Referenzprobe entnommen, die der freien Witterung ausgesetzt war.

Chlorid spielt eine große Rolle bei der Korrosion von Bewehrungsstahl. Im Falle einer Ammoniumkorrosion entweicht der entstehende Ammoniak zwar gasförmig, die Analyse auf Gesamt-Stickstoff kann jedoch Hinweise auf eine mikrobielle Aktivität im Betonporenraum geben. Außerdem wirken die Stickstoffverbindungen Nitrit und Nitrat ebenfalls depassivierend auf die Stahlbewehrung. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 1 auf der nächsten Seite zusammengefasst.

Probe	Tiefe in cm	Prob. pos.	Bemerkung	Masse % Chlorid	Masse % Gesamt Stickstoff
28.3.90-7	0 - 1	5	O ₂ reich	0,009	0,33
28.3.90-7	5 - 6	5	O ₂ reich	0,006	0,10
9.2.90-6	0 - 1	1	O ₂ arm	0,002	0,15
9.2.90-6	5 - 6	1	O ₂ arm	0,009	0,18
7.3.90-4	0 - 1		Referenz	0,004	0,22
7.3.90-4	5 - 6		Referenz	0,004	0,09

Tabelle 1: Chemische Analysen auf Chlorid und Gesamt-Stickstoff von verschiedenen Stahlbetonproben mit eingepprägten Trennrissen.

Man sieht, daß keine signifikanten Änderungen des Chlorid- bzw. Gesamt-Stickstoffgehaltes der beiden eingelagerten Probenmaterialien gegenüber der Referenzprobe zu erkennen sind. Das gleiche gilt für den Vergleich zwischen Probenrandbereich und Probeninnerem. Einen korrosionsverstärkenden Einfluß von Chloridionen bzw. Stickstoffverbindungen (Nitrat, Nitrit) auf die Bewehrung ist damit nicht zu erwarten. Auf die zunächst geplante Analyse auf Calcium wurde verzichtet, da sich ein lösender Angriff in Bezug auf Calcium zuerst durch den Abbau von Calciumhydroxid bemerkbar macht. Die Veränderungen im Calciumhydroxidgehalt können aber über die Differentialthermoanalyse sehr gut beobachtet werden.

6.6. Untersuchung der Stahlbewehrung auf Korrosion

Nach ca. 17-monatiger Einlagerungsdauer wurde der Zustand der Bewehrung der Probekörper mit eingepprägten Rissen untersucht. Deshalb wurden die zu diesem Zeitpunkt entnommenen Bohrkerne in die Bereiche eingebracht, die sowohl Bewehrung, als auch Risse in der maximalen Rißbreite enthielten. Die Bewehrung wurde freigelegt und auf ihren Korrosionszustand überprüft. Dabei konnte je nach Betonüberdeckung und maximaler Rißbreite, im Rißbereich abgestufte Korrosionserscheinungen beobachtet werden. Nur eine Probe zeigte keinerlei Korrosion an der Bewehrung (blanker Stahl). An den meisten Proben konnte eine oberflächliche Korrosion ohne deutliche Narbenbildung (Flugrost) beobachtet werden. Einige Proben zeigten Korrosionsnarben von wenigen 100 Mikrometer Tiefe. Die Korrosion ging in den meisten Fällen deutlich sichtbar vom Riß aus

und war noch einige Millimeter in den benachbarten Beton hinein zu verfolgen. Zum Beobachtungszeitraum war trotz Narbenbildung noch keine wesentliche Verminderung der Stahlquerschnitte gegeben. Bei einigen Proben war keine eindeutige Aussage über den Korrosionszustand der Bewehrung möglich, weil entweder der RiB nicht bis zur Bewehrung durchdrang, die Korrosion keinen eindeutigen Bezug zum RiBbereich zeigte oder die Probe beim Bohren zerstört wurde und im Nachhinein keine eindeutige Aussage über den Korrosionszustand der Bewehrung im RiBbereich mehr möglich war. Die folgende Tabelle 2 gibt einen Überblick über die beobachteten Korrosionserscheinungen. Die Spannweite der maximalen RiBöffnung ist bei jeder einzelnen Probe vermerkt.

Betonüberdeckung cm max. RiBbreite		2 klein	5 klein	2 groß	5 groß
Position	Bemerkung				
1	O ₂ arm max. RiBbreite in mm	X 0,05-0,25	? 0,1-0,25	XX 0,05-0,4	X 0,05-1,0
2	O ₂ reich max. RiBbreite in mm	? 0,05-0,15	? 0,05-0,2	X 0,05-0,55	? 0,10-0,7
3	O ₂ reich max. RiBbreite in mm	X 0,05-0,15	X 0,05-0,2	? 0,05-0,45	X 0,2-0,6
4	O ₂ reich max. RiBbreite in mm	? 0,05-0,2	? 0,05-0,25	? 0,1-0,7	? 0,1-0,6
5	O ₂ reich max. RiBbreite in mm	XX 0,05-0,2	0 0,05-0,2	? 0,05-1,0	XX 0,2-0,6
6	O ₂ reich max. RiBbreite in mm	XX 0,1-0,3	X 0,05-0,3	XX 0,05-0,6	X 0,05-0,6
0-keine Korrosion; X-Flugrost; XX-Korrosionsnarben, ?-keine Aussage möglich					

Tabelle 2: Korrosionserscheinungen der Stahlbewehrung der Proben mit eingepägten Trennrissen im RiBbereich.

Einige der untersuchten Stähle sind im Anhang in den Abbildungen 21 und 22 dargestellt.

Für die Entstehung dieser Korrosionserscheinungen an den Bewehrungsstählen sind im Prinzip zwei Mechanismen denkbar. Die Bewehrung wird normalerweise im angerosteten Zustand einbetoniert. Der Rost wird während des Erhärtungsprozesses in die Zementsteinstruktur eingebaut, so daß der Bewehrungsstahl im Festbeton durch das alkalische Milieu blank vorliegt. Denkbar wäre, daß dieser Mechanismus im Rißbereich nicht vollständig abläuft, so daß es sich hier um Reste des ursprünglichen am Stahl haftenden Rostes handelt. Dies ist aber bei verstärkter Korrosion mit Narbenbildung mit großer Sicherheit auszuschließen. In diesem Fall ist die Neubildung von Rost im Rißbereich sehr wahrscheinlich. Aus der Tabelle geht hervor, daß bei den Körpern mit einer großen maximalen Rißbreite teilweise starke Korrosion mit Narbenbildung zu beobachten war. Diese starke Korrosion ist nicht an die Proben gebunden, die eine extrem große maximale Rißöffnung von z.B. 1,0 mm aufweisen, sondern tritt bei Proben mit einer maximalen Rißöffnung von 0,4 bzw. 0,6 mm auf. Auch bei den Proben mit kleiner maximalen Rißöffnung und 2 cm Betondeckung konnte solch starke Korrosion beobachtet werden, allerdings nur bei Proben mit 0,2 bzw. 0,3 mm maximaler Rißöffnung. Nur bei den Proben mit kleiner maximalen Rißbreite und einer Betondeckung von 5 cm konnte keine Korrosion bis zur Narbenbildung festgestellt werden. Diese Ergebnisse zeigen, daß es völlig gerechtfertigt war die Bildung von Temperaturrissen durch Verwendung eines NW Zementes weitgehend zu vermeiden, beziehungsweise aufgetretene Risse nachträglich zu verschließen. Auch die Betondeckung von mindestens 4 cm wird sich sicherlich positiv auf die Dauerhaftigkeit des Bauwerkes auswirken. Ob sich die in diesem Bericht als Flugrost bezeichneten Korrosionserscheinungen verstärken werden und mit welcher Geschwindigkeit die nachgewiesene Korrosion fortschreiten wird, läßt sich nur durch langfristige Beobachtung feststellen.

6.7. Mikrobielle Besiedlung des Betons

Die Untersuchung der mikrobiellen Besiedlung des Betons wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrobiologie der TU Braunschweig (Prof. Hanert) im Rahmen einer Studienarbeit durchgeführt /12/. Es wurden nach ca. 17-monatiger Einlagerungsdauer 6 Bohrkerne aus Proben der Positionen 1 (sauerstoffarm) und 4 (sauerstoffreich) untersucht. Zum Vergleich wurden Bohrkerne aus einer nicht eingelagerten Probe, die atmosphärisch bewittert wurde (Blindprobe),

und ein Bohrkern aus dem alten Belebungsbecken 2 untersucht. Der Beton dieses Belebungsbeckens zeigt starke Schäden (Abplatzungen, Schalenbildung) und war mit einem Schutzanstrich versehen, der zum Zeitpunkt der Probennahme jedoch weitgehend zerstört war. Aus den Bohrkernen wurden folgende Proben entnommen:

Probennummer	Tiefe in cm	beprobte wurde...
1	0,0 - 0,5	die sauerstoffreiche Zone (Sauerstoffsättigung 50,0 %)
2	1,5 - 2,5	
3	4,0 - 5,0	
4	0,0 - 0,5	die sauerstoffarme Zone (Sauerstoffsättigung 4,2 %)
5	1,5 - 2,5	
6	4,0 - 5,0	
7	0,0 - 0,5	die Blindprobe
8	1,5 - 2,5	
9	4,0 - 5,0	
10a	0,2 - 0,7	das alte Belebungsbecken
11	1,5 - 2,5	
12	4,0 - 5,0	
10b	0,0 - 0,2	

Tabelle 3: Für die Untersuchung der mikrobiellen Besiedlung des Betons hergestellte Proben (aus /12/).

An diesen Proben wurden Untersuchungen der Gesamtkeimzahl und der Keimzahlen von Thiobacillen und Nitrifizierer mit Hilfe der MPN-Methode durchgeführt. Diese beiden säurebildenden Bakterienarten werden hauptsächlich für den biologischen Angriff auf Betonbauwerke verantwortlich gemacht (lösender Angriff). Nitrifizierer bauen Ammonium zu Nitrit (Ammoniumoxidierer) bzw. Nitrit zu Nitrat ab (Nitritoxidierer). Da Nitrifizierer aber nur im pH-Bereich 7-8 optimal wachsen können, brauchen sie ein Milieu mit ausreichender Pufferkapazität. Alle bei diesem Prozess beteiligten Stoffe (Ammonium, Nitrit, Nitrat, Salpetersäure) können lösend, bzw. korrosiv auf die Bewehrung von Stahlbeton einwirken.

Thiobacillen oxidieren reduzierte Schwefelverbindungen zu Sulfat. Neben dem lösenden Angriff durch Schwefelsäure können also auch treibende Effekte durch Sulfat auftreten. Je nach Art des Thiobacillus liegen die optimalen Wachstumsbedingungen im pH-Bereich zwischen 1 und 8.

Die folgenden Abbildungen 7 und 8 geben einen Überblick über die ermittelten Keimzahlen.

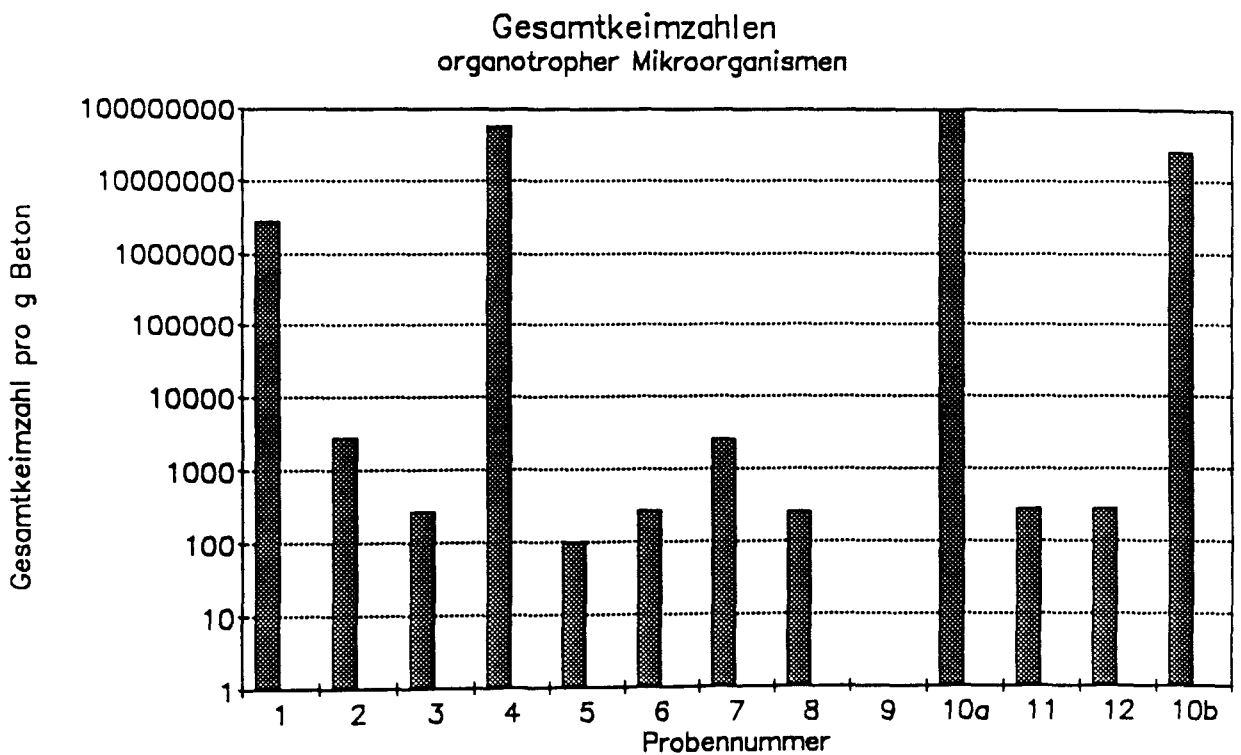


Abbildung 7: Logarithmische Darstellung der Keimzahl aerober organotropher Mikroorganismen auf allen Bohrkernscheiben (umgezeichnet nach /12/).

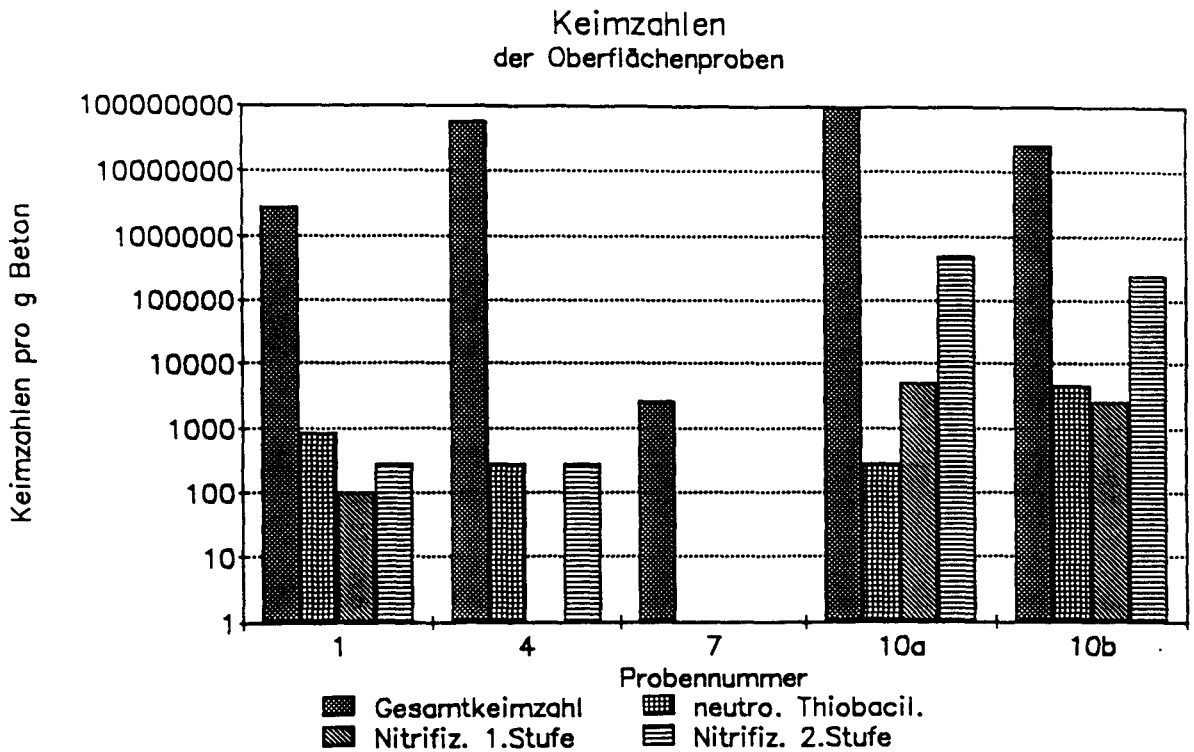


Abbildung 8: Logarithmische Darstellung der verschiedenen Keimzahlen der Oberflächenproben (umgezeichnet nach /12/).

Die Gesamtkeimzahlen der verschiedenen Oberflächenproben sind sehr ähnlich. Der größte Wert wird von der Oberflächenprobe des alten Belebungsbeckens erreicht. Die Proben aus den tieferen Schichten der Bohrkerne erreichen Gesamtkeimzahlen die im Bereich der Blindprobe liegen und damit wesentlich kleiner sind als die Gesamtkeimzahlen der Oberflächenproben. Eine gewisse Verfälschung der Keimzahlen durch die Probenaufbereitung (Nasses Ausbohren und Sägen der Bohrkerne) ist nicht auszuschließen.

Thiobacillen und Nitrifizierer waren nur in den Oberflächenproben der Bohrkerne nachweisbar. In der Blindprobe konnten keine Thiobacillen oder Nitrifizierer nachgewiesen werden. Die Oberflächenproben aus dem alten Belebungsbecken zeigten deutlich höhere Keimzahlen von Nitrifizierern als die Proben aus dem neuen Belebungsbecken.

Mit dem REM konnten auf allen untersuchten Betonsorten Bakterien beobachtet werden. Auf dem Beton des alten Belebungsbeckens waren auch in 1,5 cm Tiefe noch Zellen nachweisbar.

Weiterhin wurden Laborversuche durchgeführt, in denen Probekörper aus reinem Zementstein (gleiches Bindemittel wie auf der Kläranlage) über einen Zeitraum von 2 Monaten mit Abwasser aus der Kläranlage watenbüttel in Verbindung gebracht wurden. Das Abwasser wurde zweimal pro Woche erneuert. Durch Einblasen von Luft wurde eine Spritzwasserzone erzeugt. Danach wurden die Zementsteinproben in Medien für neutrophile Thiobacillen bzw. Nitrifizierer und Leitungswasser überführt. Nach der Einstellung einer konstanten Atmungsrate wurde der Sauerstoffverbrauch, der pH-Wert und die Konzentrationen von Sulfat, Nitrit und Nitrat in den Lösungen verfolgt. Diese Versuche zeigten, daß auf der Oberfläche der Zementsteinkörper tatsächlich Thiobacillen und Nitrifizierer angesiedelt wurden. Die Verhältnisswerte der gemessenen Parameter stimmten sehr gut mit den entsprechenden Gleichungen zur Nitrifikation und Schwefeloxidation überein. Die Säureproduktion der Mikroorganismen, sowie die Pufferwirkung des Zementsteins konnten gut verfolgt werden.

In ein Belebungsbecken der Kläranlage wurden Aufwuchskörper zur Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der mikrobiellen Besiedlung eingehängt. Dabei handelte es sich um sterile Betonscheiben aus dem tieferen Bereich der entnommenen Bohrkerne, sowie um Glasobjektträger. Die Gesamtkeimzahl, sowie die Keimzahlen der Thiobacillen und Nitrifizierer sind im Anhang in den Abbildungen 23 und 24 als Funktion der Zeit aufgetragen.

Die Untersuchungen zeigten, daß die Betonproben mit Thiobacillen und Nitrifizierern wesentlich schneller besiedelt wurden als die Glasoberfläche. Ähnliches war bei der Gesamtkeimzahl nicht zu beobachten. Außerdem wurde der alte Beton wesentlich schneller von Thiobacillen und Nitrifizierern besiedelt als der neue Beton.

An den Aufwuchskörpern wurden Messungen des Substanzverlustes durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 24 im Anhang aufgeführt. Der Substanzverlust kann nicht ohne weiteres auf das reale Bauwerk übertragen werden, da die eingehängten Aufwuchsproben eine vergleichsweise große Oberfläche besaßen. Außerdem ist nicht zu differenzieren in welchem Maße der Substanzverlust durch eine biologische oder chemische Korrosion verursacht wurde oder durch mechanische Einwirkungen (Strömung). Trotzdem zeigt auch diese Untersuchung, daß der neue Beton einen geringeren Substanzverlust als Funktion der Zeit aufweist als der alte Beton.

Zusammenfassend ist zu bemerken, daß die entnommenen Proben fast durchgehend mit Mikroorganismen besiedelt waren. Säureproduzierende Nitrifikanten und Thiobacillen, die hauptsächlich für biogene Betonkorrosion verantwortlich gemacht werden, konnten nur in den Betonproben nachgewiesen werden, die mit Abwasser in Berührung kamen und auch hier nur in den Proben aus einer Tiefe von 0,0 - 0,5 cm. Die Gesamtkeimzahl und vor allem die Keimzahl der Nitrifizierer war bei den Proben aus dem alten Belebungsbecken wesentlich größer als bei den Proben aus dem neuen Becken. Anzeichen für eine biogene Korrosion konnten bei den Proben aus dem neuen Beton bislang nicht erkannt werden. Auch die Verhältnisswerte von Thiobacillen und Nitrifikanten zur Gesamtkeimzahl der Proben aus dem neuen Belebungsbecken lassen zum jetzigen Zeitpunkt keine biogene Korrosion erwarten. Im Falle des alten Belebungsbeckens ist durchaus mit einer biogenen Korrosion durch Nitrifikanten zu rechnen (Vergleichswerte aus /13,14,15/). Versuche zum zeitlichen Verlauf der mikrobiellen Besiedlung lassen den Schluß zu, daß der neue Beton gegen mikrobielle Korrosion widerstandsfähiger sein wird als der Beton des alten Belebungsbeckens. Auch die Messung des Substanzverlusts der Betone als Funktion der Zeit deutet darauf hin, daß der Beton der neuen Belebungsbecken widerstandsfähiger ist als der Beton des alten Belebungsbeckens. Abschließend ist zu bemerken, daß Thiobacillen und Nitrifikanten an ein Milieu mit pH-Werten kleiner 9 gebunden sind. Alle Maßnahmen, die die Carbonatisierung des Betons verlangsamen, sind deshalb gleichzeitig auch Maßnahmen, die eine Besiedlung von Beton mit diesen Bakterien verlangsamen können.

6.8. Makroskopische Veränderungen der Proben

Die Stahlbetonproben mit eingepprägten Rissen zeigen bei Einlagerung in sauerstoffreiche Bereiche einen schleimigen Bewuchs und bei Einlagerung in sauerstoffarme Bereiche einen schwarzen Belag, der während dem Abtrocknen der Probekörper schnell verblaßt (siehe Abb. 4). Im Rahmen der mikrobiologischen Untersuchungen dieser Proben (siehe Kap. 6.7.) konnte festgestellt werden, daß es sich im ersten Fall um einen Film aus aerob wachsenden Stäbchen handelt und im zweiten Fall um einen Sulfid-Belag, der auf einen hohen Anteil an anaeroben Desulfurizierern hindeutet.

Nach 10-monatiger Einlagerungsdauer in das Belebungsbecken konnten an den Stahlbetonproben mit eingepprägten Rissen zuerst auffällige sichtbare Verände-

rungen der Probenoberflächen wahrgenommen werden. Es traten an einigen Proben abgebrochene Kanten und Rißflanken auf. Die Laboruntersuchungen der Betonproben deuten jedoch darauf hin, daß es sich hierbei um mechanische Einwirkungen oder Frosteinwirkung auf den Beton handelt da keinerlei Anzeichen für einen chemischen Angriff beobachtet werden konnten.

6.9. Abwasserpenetration im ungerissenen Beton

Es wurde versucht die Eindringtiefe des Abwassers an den frisch gespaltenen Bohrkernen aus den eingehängten Probekörpern zu bestimmen. In den allermeisten Fällen war keine eindeutige Eindringtiefe zu erkennen. Dies deutet jedoch darauf hin, daß es sich um einen sehr dichten Beton mit einem geringen Kapillarporenvolumen handelt. In diesen Fällen hat man auch beim Wassereindringversuch nach DIN 1048 Schwierigkeiten die Wassereindringtiefe genau zu lokalisieren.

In den Fällen, in denen eine Abwassereindringtiefe vermutet werden konnte, lag sie zwischen 1,1 und 3,7 cm, nur in wenigen Ausnahmefällen bei bis zu 6,2 cm (ungerissener Beton, ca. 4-monatige Einlagerungsdauer). Abbildung 25 im Anhang zeigt einen gespaltenen Bohrkern mit eingezeichneter Abwassereindringtiefe. Die entsprechende Probe war an der Position 2 in das Belebungsbecken eingehängt.

7. Diskussion

Durch den Ammoniumgehalt des Abwassers ist in Bereichen der Kläranlage mit einem starken lösenden Angriff nach DIN 4030 auf die Betonbauwerke zu rechnen. Weder die mikroskopische Untersuchung der Betonoberfläche, noch die Untersuchung des Phasenbestandes, der Porenradienverteilung, des kapillaren Wassersaugens und der Gaspermeabilität der oberflächennahen Betonschicht der Proben mit eingepprägten Trennrissen lassen jedoch bis jetzt Anzeichen für einen lösenden Angriff erkennen.

Die Messung der Gaspermeabilität dieser Proben zeigt, daß die Permeabilität des Betons seit dem ersten Beaufschlagen noch abgenommen hat. Eine Gefährdung für die Dichtigkeit des Betons ist damit z. Zt. nicht gegeben.

Auch die Untersuchungen zur mikrobiellen Besiedlung lassen zur Zeit keine Gefährdung des Betons erwarten. Der Beton der neu erstellten Bauwerke verhält sich in Bezug auf eine mikrobielle Besiedlung durch betonschädliche Mikroorganismen günstiger als der Beton der älteren Belebungsbecken der Anlage.

Die Untersuchung der Betonproben auf Chlorid und Gesamt-Stickstoff lassen keinen korrosionsverstärkenden Einfluß von Chloridionen bzw. Stickstoffverbindungen (Nitrat, Nitrit) auf die Bewehrung erwarten. Es zeigte sich, daß sowohl eine Vergrößerung der Betonüberdeckung von 2 auf 5 cm, als auch eine Verminderung der maximalen Rißbreiten einen deutlichen positiven Effekt auf die Korrosion der Bewehrung im Rißbereich hat. Aber auch bei 5 cm Betonüberdeckung und einer maximalen Rißbreite von 0,2 mm konnten noch schwächere Korrosionserscheinungen an den Stählen beobachtet werden. Die Ergebnisse zeigen, daß die Vermeidung von Rissen bzw. die Verkleinerung der Rißbreiten und das nachträgliche Verschließen aufgetretener Risse für die Dauerhaftigkeit solcher Bauwerke eine große Bedeutung hat. Ob und mit welcher Geschwindigkeit sich die beobachteten Korrosionserscheinungen verstärken werden, muß durch längerfristige Beobachtung untersucht werden.

8. LITERATUR

- /1/ Calleja, J.: Durability. Sub-Theme VII-2, 7th Int. Congr. Chem. Cem., Vol.1, Paris (1980)
- /2/ Schießl, P.: Wirkung von Steinkohlenflugasche in Beton. Beton, Bd.40, S.519-523 (1990)
- /3/ Mehta, P.K.: Influence of pozzolanic admixtures on the transition zone in concrete. Int. Sem. on some aspects of admixtures and industrial by-products on the durability of concrete, Session II, Göteborg (1986)
- /4/ Brodersen, H.A.: Zur Abhängigkeit der Transportvorgänge verschiedener Ionen im Beton von Struktur und Zusammensetzung des Zementsteins. Dissertation, Aachen (1982)
- /5/ Biczok, I.: Betonkorrosion, Betonschutz. 5. Aufl. Bauverlag, Wiesbaden (1968)
- /6/ Schmidt, F.; Rostásy, F.S.; Budelmann, H.: Entwicklung und Erprobung von Rezepturen für extrem dichten und dauerhaften Beton für Bauwerke für den Gewässerschutz. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch den Niedersächsischen Minister für Wissenschaft und Kunst (1992)
- /7/ Schmidt, F.: Dauerhafter Beton für Deponiebauwerke. Entwicklung und Erprobung verschiedener Rezepturen. In: Budelmann, H. (Hrg.): Technologie und Anwendung der Baustoffe, S.135-142. Festschrift F.S. Rostásy, Ernst und Sohn, Berlin (1992)
- /8/ Rostásy F.S.: Zur Messung der Betondichtigkeit am Bauwerk - Möglichkeiten und Grenzen. Festschrift H.K. Hilsdorf, S. 45-64 (1990)
- /9/ Dhir, R.K.; Hewlett, P.C.; Chan, Y.N.: Near-surface characteristics of concrete: assessment and development of in situ test methods. Magazine of Concrete Research, Vol. 39, S.183-195 (1987)
- /10/ Paulmann, K.: Ein Verfahren zur Messung und Beurteilung der Dichtigkeit von Betonoberflächen. In: Budelmann, H. (Hrg.): Technologie und Anwendung der Baustoffe, S.127-130. Festschrift F.S. Rostásy, Ernst und Sohn, Berlin (1992)
- /11/ Gräf, H.; Grube, H.: Verfahren zur Prüfung der Durchlässigkeit von Mörtel und Beton gegenüber Gasen und Wasser. Beton, Bd. 36, S.184-187 und S.222-226 (1986)
- /12/ Wagner, D.: Untersuchungen zur mikrobiellen Besiedlung von korrosionsgefährdeten Betonoberflächen in Belebungsbecken. Studienarbeit durchgeführt am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Fachgebiet Baustoffkunde und Stahlbetonbau im Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrobiologie der Technischen Universität Braunschweig (1993)
- /13/ Milde, K.; Sand, W.; Wolff, W.; Bock, E.: Thiobacilli of the corroded concrete walls of the Hamburg sewer system. Journal of General Microbiology, Bd. 129, S.1327-1333 (1983)

- /14/ Sand, W.; Ahlers, B.; Krause-Kupsch, T.; Meincke, M.; Krieg, E.; Diercks, M.; Sameluck, F.; Bock, E.: Mikroorganismen und ihre Bedeutung für die Zerstörung von mineralischen Baustoffen. UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox. 3, S.36-40, ecomed Verlags GmbH Landsberg/München/Zürich (1989)
- /15/ Kirstein, K.; Stiller, W.; Bock, E.: Mikrobielle Einflüsse auf Betonkonstruktionen. Beton- und Stahlbetonbau, Nr.8/86, S. 202-205 (1986)

- /N1 DIN 4030. Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase. Teil 1 und 2, Juni 1991. Beuth Verlag GmbH, Berlin (1991)

9. ANHANG

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung der Abwässer der Abwasserbehandlungsanlage Braunschweig-Watenbüttel. Probennahme am 23.1.1989.

	Einheit	Probe 1	Probe 2	Probe 3
Entnahmestelle		Abwasser- zulaufpump- werk	Belebungs- becken 1	Nachklär- becken 1
Geruch		Abwasser	Abwasser	Abwasser
Aussehen, Farbe		leicht trübe	gelblich trübe	leicht trübe
Art u. Farbe des Ungelösten		wenig braun	sehr viel braun-schw.	wenig hell
pH-Wert (elektrometrisch)		8,7	7,2	7,4
Kaliumpermanganatverbr.	mg/l	147	373	503
Calcium	mg/l	144	68	64
Magnesium	mg/l	5,8	0,7	1,0
Chlorid	mg/l	193	103	96
Sulfat	mg/l	145	113	117
kalklös. Kohlensäure CO ₂	mg/l	0	0	0
Gesamtstickstoff N	mg/l	76	158	58
Gesamtstickstoff als NH ₄ ⁺	mg/l	98	203	75
Ammonium	mg/l	67	135	65
Eisen (III)	mg/l	nn	Spuren	nn
Sulfid	mg/l	Spuren	Spuren	Spuren
Nitrat	mg/l	n	n	n
Gesamthärte	°dH	21,6	9,7	9,3
Scheinbare Carbonathärte	°dH	21,9	28,6	15,7

Tabelle 5: Ammoniumkonzentrationen als N in mg/l im Jahr 1988 nach Informationen des Tiefbauamts der Stadt Braunschweig.

Woche	Zulauf	Ablauf	Woche	Zulauf	Ablauf
1	29,7	23,2	33	33,5	23,8
2	31,2	23,6	34	34,7	30,1
3	32,9	23,5	35	35,0	27,2
4	31,2	21,6	36	33,9	24,3
5	31,3	16,2	37	24,3	32,9
6	32,2	26,8	38	39,3	31,6
7	33,1	24,3	39	34,6	28,0
8	27,4	9,5	40	42,7	34,7
9	26,2	23,1	41	40,2	36,0
10	26,8	18,9	42	39,4	35,0
11	20,1	20,9	43	45,6	45,1
12	10,6	8,8	44	36,9	31,3
13	15,4	14,7	45	48,2	42,1
14	15,7	23,6	46	39,9	33,2
15	18,0	24,4	47	45,4	42,5
16	23,1	26,5	48	47,3	39,8
17	25,6	26,7	49	30,0	17,9
18	23,5	23,8	50	34,8	28,5
19	27,9	29,3			
20	33,0	29,6			
21	40,7	31,1			
22	34,7	32,9			
23	29,2	29,3			
24	35,3	24,6			
25	33,2	24,8			
26	31,8	23,8			
27	31,9	26,4			
28	30,2	27,6			
29	29,9	21,6			
30	25,3	16,4			
31	34,5	31,7			
32	34,3	32,1			

Tabelle 6: Ammonium- bzw. Stickstoffkonzentrationen im Abwasser der Kläranlage Braunschweig-Watenbüttel. Probennahme am 01.02.1989.

Probe Entnahmestelle		Ammonium direkt (kein Aufschluß) als N als NH ₄ mg/l mg/l		Gesamt-Stickstoff nach Kjeldahl als N als NH ₄ mg/l mg/l	
1	Abwasserdrucklei- tung im Zulauf zur Rechenanlage	59,6	76,8	70,4	90,7
2	Abwasserzulauf- pumpwerk	60,1	77,4	77,0	99,2
3	Abwasserzulauf- pumpwerk	61,1	78,7	72,0	92,7
4	Rücklaufschlamm- pumpwerk	35,8	46,1	36,0	46,5
5	Einlauf Bele- bungsbecken	34,5	44,4	37,7	48,6
6	Belebungsbecken 1	35,4	45,6	39,0	50,3
7	Belebungsbecken 2	36,1	46,5	39,8	51,3
8	Verteilerbau- werk 1	34,7	44,7	40,0	51,5
9	Nachklärbecken 1	35,1	45,2	38,2	49,2
10	Nachklärbecken 2	34,2	44,1	38,2	49,1

Tabelle 7: In der Erweiterung der Abwasservorbehandlungsanlage Braunschweig verwendete Betonrezepturen.

Betonsorte Verwendung	61433.1 allgemein bis Januar 1990 etwa Probewand 1	61423.1 Sohlplatten bis Januar 1990	62433.1 enge Bewehrung
Konsistenz	KR	KP	KR
angestrebte Festigkeitsklasse	B 35	B 35	B 35
Zementart		HOZ 35 L NW HS NA	
Zementgehalt kg/m ³	370	360	390
Wasser kg/m ³	174	170	185
w/z - Wert bzw. Wasserbindemittelw.	0,47	0,47	0,47
Zuschlagart	A/B 32	A/B 32	A/B 16
Gehalt kg/m ³	1808	1830	1765
0/2 %	38	38	37
2/8 %	6	6	18
8/16 %	26	26	45
16/32 %	30	30	
Zusatzmittel	Woermann BV 25	Woermann BV 25	Woerm. BV 25
Gehalt	0,5 % v.Z.	0,6 % v.Z.	0,5 % v.Z.

Tabelle 8: In der Erweiterung der Abwasservorbehandlungsanlage Braunschweig verwendete Betonrezepturen.

Betonsorte Verwendung	61433.2 allgemein ab Februar 1992 Proben mit ein- geprägten Rissen	61423.2 Sohlplatten ab Februar 1992	62433.2 enge Bewehrung
Konsistenz	KR	KP	KR
angestrebte Fe- stigkeitsklasse	B 35	B 35	B 35
Zementart		HOZ 35 L NW HS NA	
Zementgehalt kg/m ³	380	360	390
Wasser kg/m ³	171	162	176
w/z - Wert bzw.	0,45	0,45	0,45
Wasserbindemittelw.			
Zuschlagart	A/C 32	k.A.	k.A.
Gehalt kg/m ³	1816	1839	1776
0/2 %	38	38	37
2/8 %	6	6	18
8/16 %	26	26	45
16/32 %	30	30	
Zusatzmittel 1	Woermann BV 25	Woermann BV 25	Woermann BV 25
Gehalt	0,5 % v.Z.	0,5 % v.Z.	0,5 v.Z.
Zusatzmittel 2	Woermann FM 26	Woermann FM 26	Woermann FM 26
Gehalt	0,4 % v.Z.	0,5 % v.Z.	0,5 v.Z.

Tabelle 9: In der Erweiterung der Abwasservorbehandlungsanlage Braunschweig verwendete Betonrezepturen.

Betonsorte Verwendung	61433.2 Flugasche- beton etwa Probewand 2
Konsistenz	KR
angestrebte Festigkeitsklasse	B 35
Zementart	HOZ 35 L NW HS NA
Zementgehalt kg/m ³	330
Wasser kg/m ³	162
w/z - Wert bzw.	0,47
Wasserbindemittelw.	
Zusatzstoff	Flugasche
Zusatzstoffgehalt kg/m ³	50
Zuschlagart	A/B 32
Gehalt kg/m ³	1817
0/2 %	30
2/8 %	12
8/16 %	29
16/32 %	29
Zusatzmittel 1	Woermann BV 14
Gehalt	0,6 % v.Z.
Zusatzmittel 2	Woermann FM 26
Gehalt	k.A.

Tabelle 10: Frischbetonprüfungen, Würfeldruckfestigkeit und Wassereindringtiefe der am 7.3.90, 28.3.90 und 16.5.90 hergestellten Stahlbetonproben mit eingepprägten Trennrissen. Daten zu den Probewänden I und II.

Herstellungsdatum	7.3.1990	28.3.1990	16.5.1990
Ausbreitmaß in cm	47	46 45	41 42
Rohdichte in kg/dm ³	2,55 2,51	2,42	
Temperatur Luft °C	3	9	15,9
Temperatur Bet. °C	10	10	18,7
Würfeldruckfestigkeit in N/mm ² (28 Tage)	41 45 42	52 52 52	46 48 45
Mittel	43	52	46
Wassereindringtiefe in cm nach DIN 1048	1,3 1,1 1,2	1,1 1,1 1,5	1,3 0,8 0,9
Mittel	1,2	1,2	1,0
Prüfalter in Tagen	65	33	33
	Probewand I		Probewand II
	Alter in Tagen		Alter in Tagen
	28 56		33
Würfeldruckfestigkeit in N/mm ²	38 46		
Wassereindringtiefe in mm	18		36

Tabelle 11: Rißbreiten und Positionen der Stahlbetonbetonproben mit eingepprägten Trennrissen im Belebungsbecken 5 der Abwasservorbehandlungsanlage Braunschweig.

Betonüberdeckung in cm		2	5	2	5
Rißbreite		klein	klein	groß	groß
Proben- position					
1	Probenbezeichnung max. Rißbreite mm	7.3.90-1 0,05-0,25	9.2.90-6 0,1-0,25	9.2.90-2 0,05-0,4	7.3.90-7 0,05-1,0
2	Probenbezeichnung max. Rißbreite mm	16.5.90-5 0,05-0,15	28.3.90-1 0,05-0,2	28.3.90-5 0,05-0,55	16.5.90-6 0,10-0,7
3	Probenbezeichnung max. Rißbreite mm	28.3.90-3 0,05-0,15	28.3.90-4 0,05-0,2	28.3.90-6 0,05-0,45	28.3.90-2 0,2-0,6
4	Probenbezeichnung max. Rißbreite mm	16.5.90-3 0,05-0,2	16.5.90-7 0,05-0,25	16.5.90-8 0,1-0,7	16.5.90-2 0,1-0,6
5	Probenbezeichnung max. Rißbreite mm	28.3.90-8 0,05-0,2	7.3.90-3 0,05-0,2	7.3.90-5 0,05-1,0	28.3.90-7 0,2-0,6
6	Probenbezeichnung max. Rißbreite mm	9.2.90-1 0,1-0,3	9.2.90-8 0,05-0,3	9.2.90-4 0,05-0,6	9.2.90-5 0,05-0,6

POS. ① : 4 ϕ 10 pro Probekörper

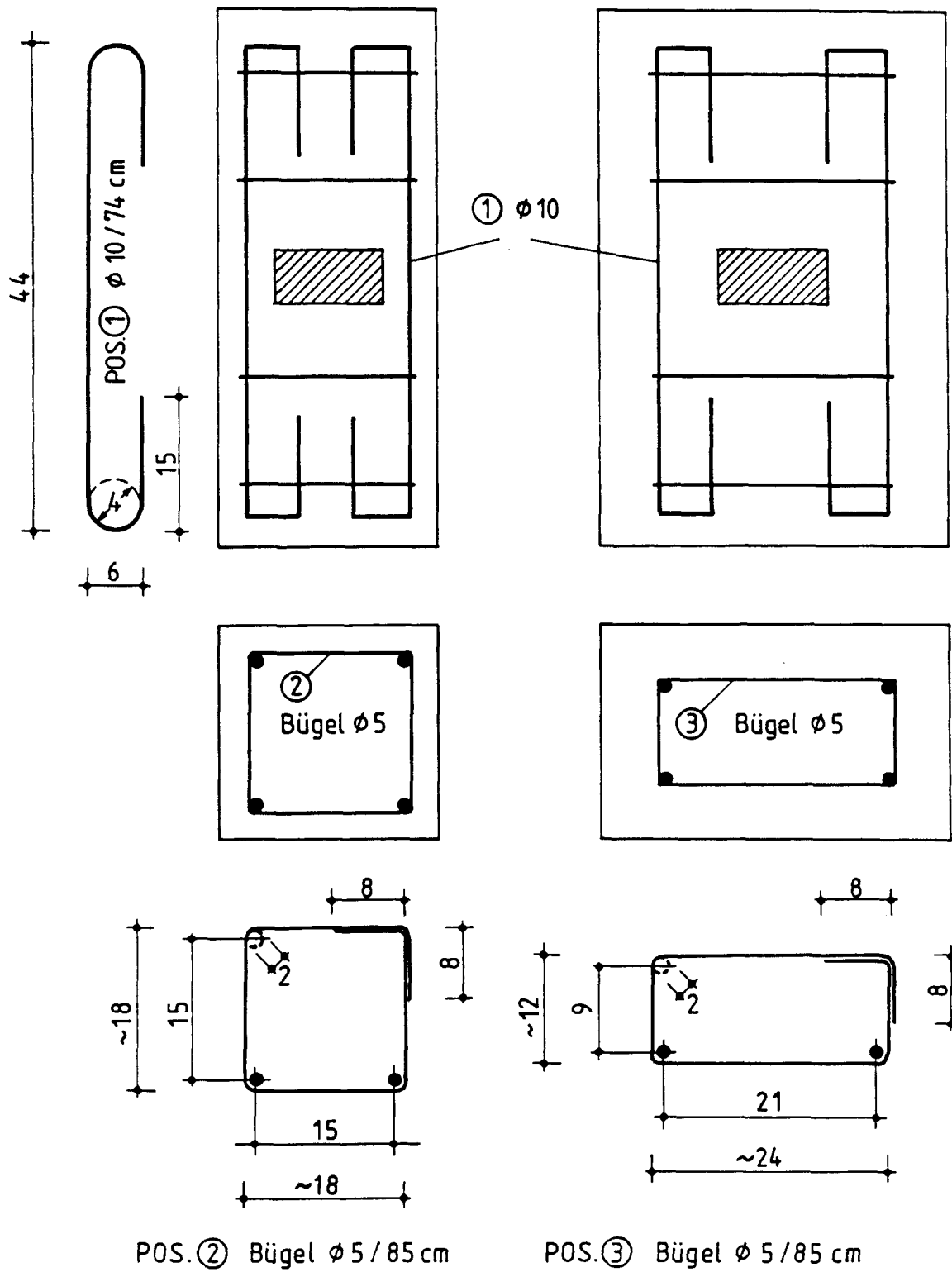


Abbildung 9: Bewehrungsplan der Stahlbetonkörper mit eingepprägten Trennrissen.

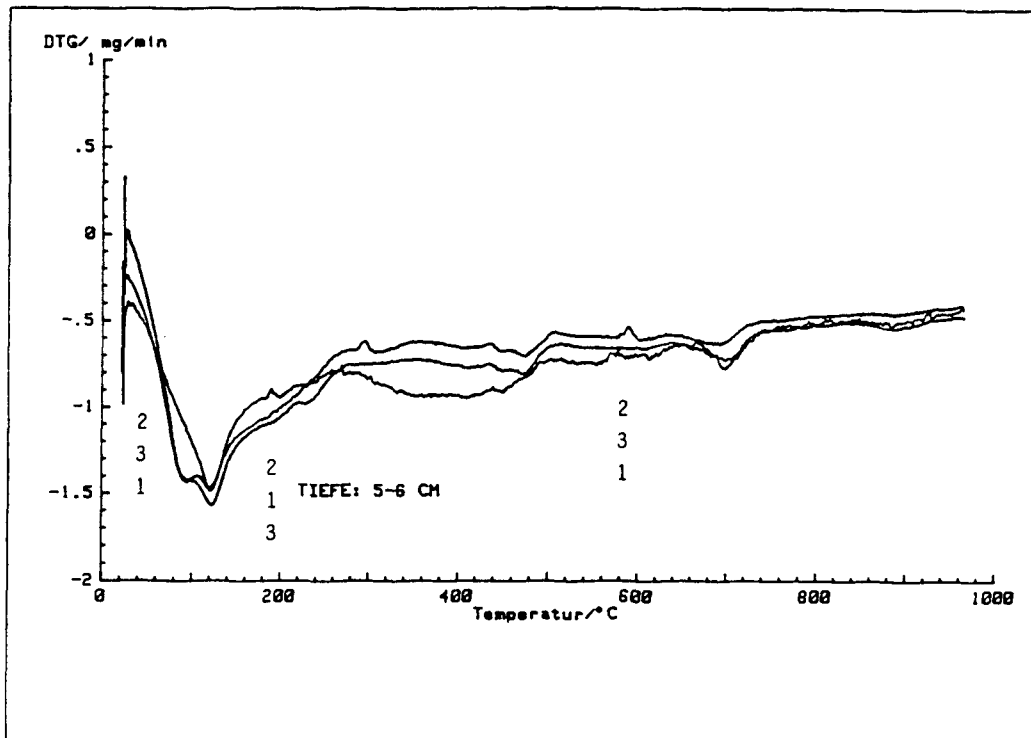
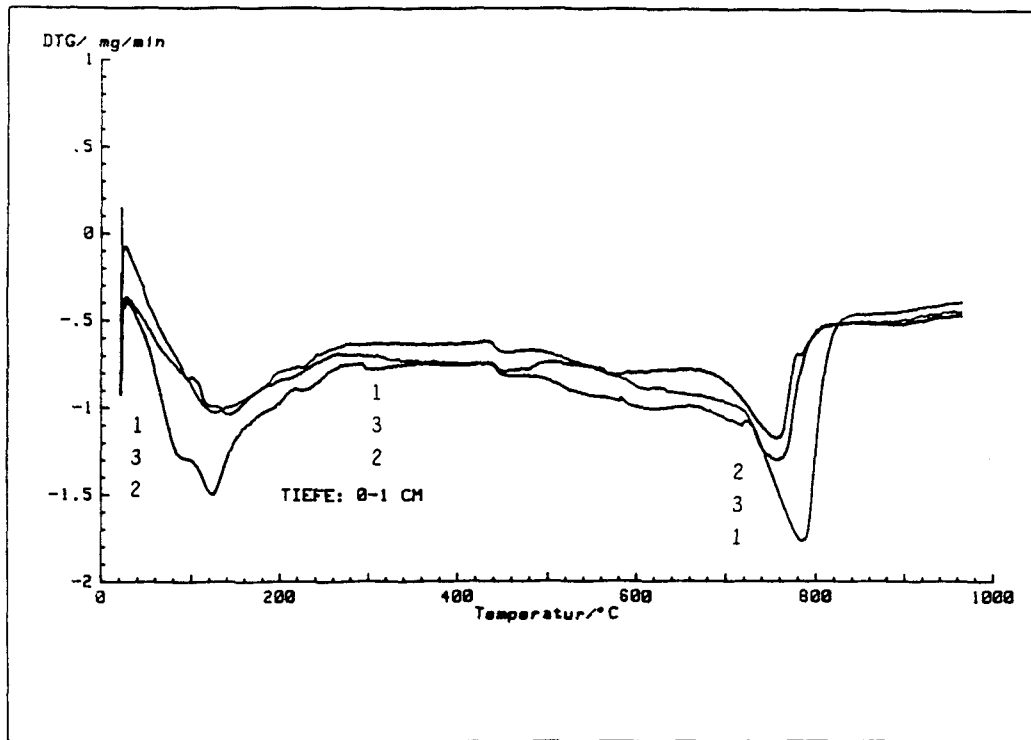


Abbildung 10: DTG-Analysen von Stahlbetonproben mit eingepprägtem Trennriß. Kurve 1: Probe 9.2.90-6, Position 1 (sauerstoffarm). Kurve 2: Probe 28.3.90-7, Position 5 (sauerstoffreich). Kurve 3: Probe 7.3.90-4, atmosphärisch bewittert. Oben: aus 0-1 cm Tiefe. Unten: aus 5-6 cm Tiefe.

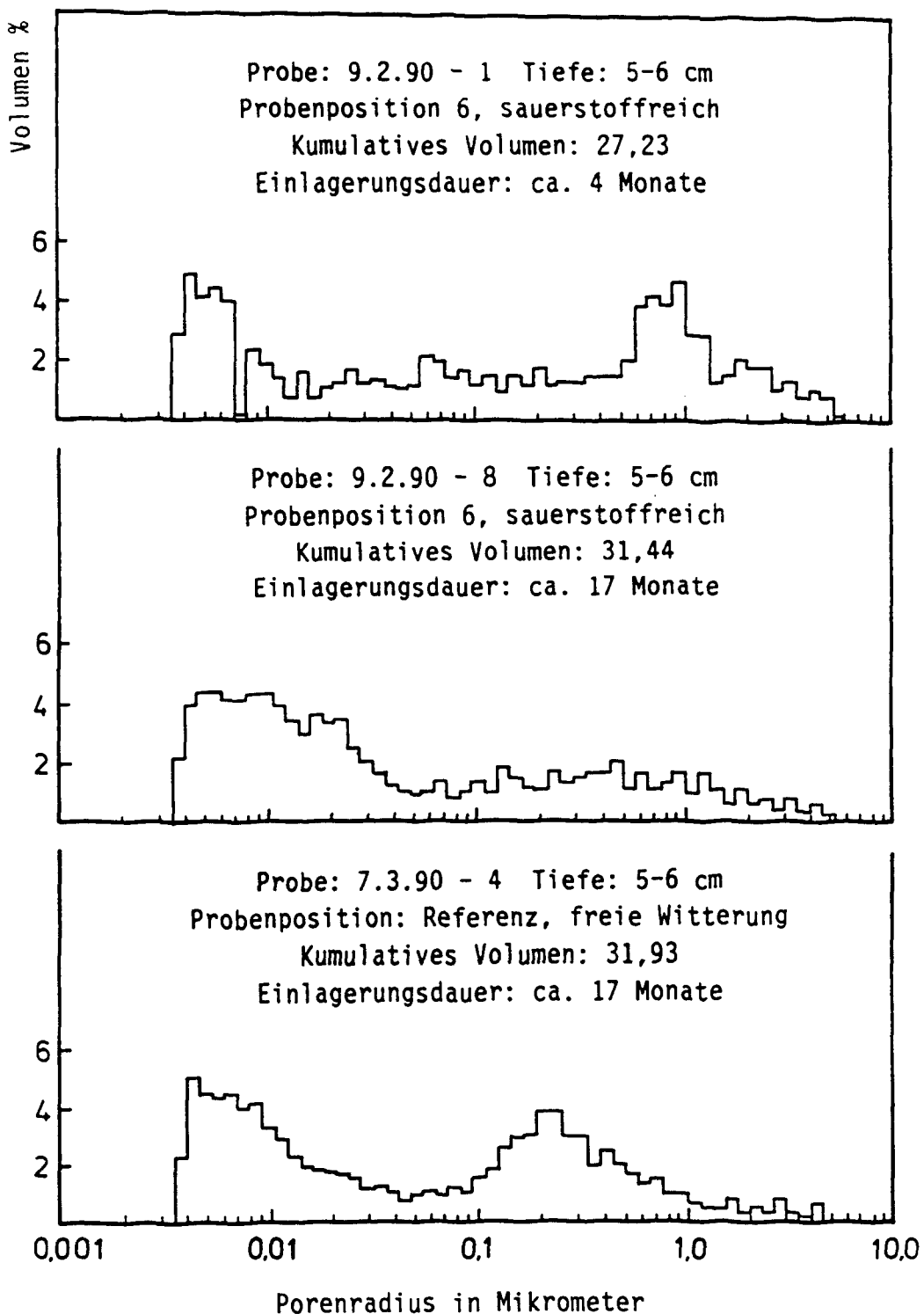


Abbildung 11: Porenradienverteilungen von Stahlbetonproben mit eingepprägtem Trennriß. Tiefe: 5-6 cm. Probenposition 6 (sauerstoffreich). Oben: Einlagerungsdauer 4 Monate, Mitte: Einlagerungsdauer 17 Monate, Unten: Referenzprobe, atmosphärisch bewittert.

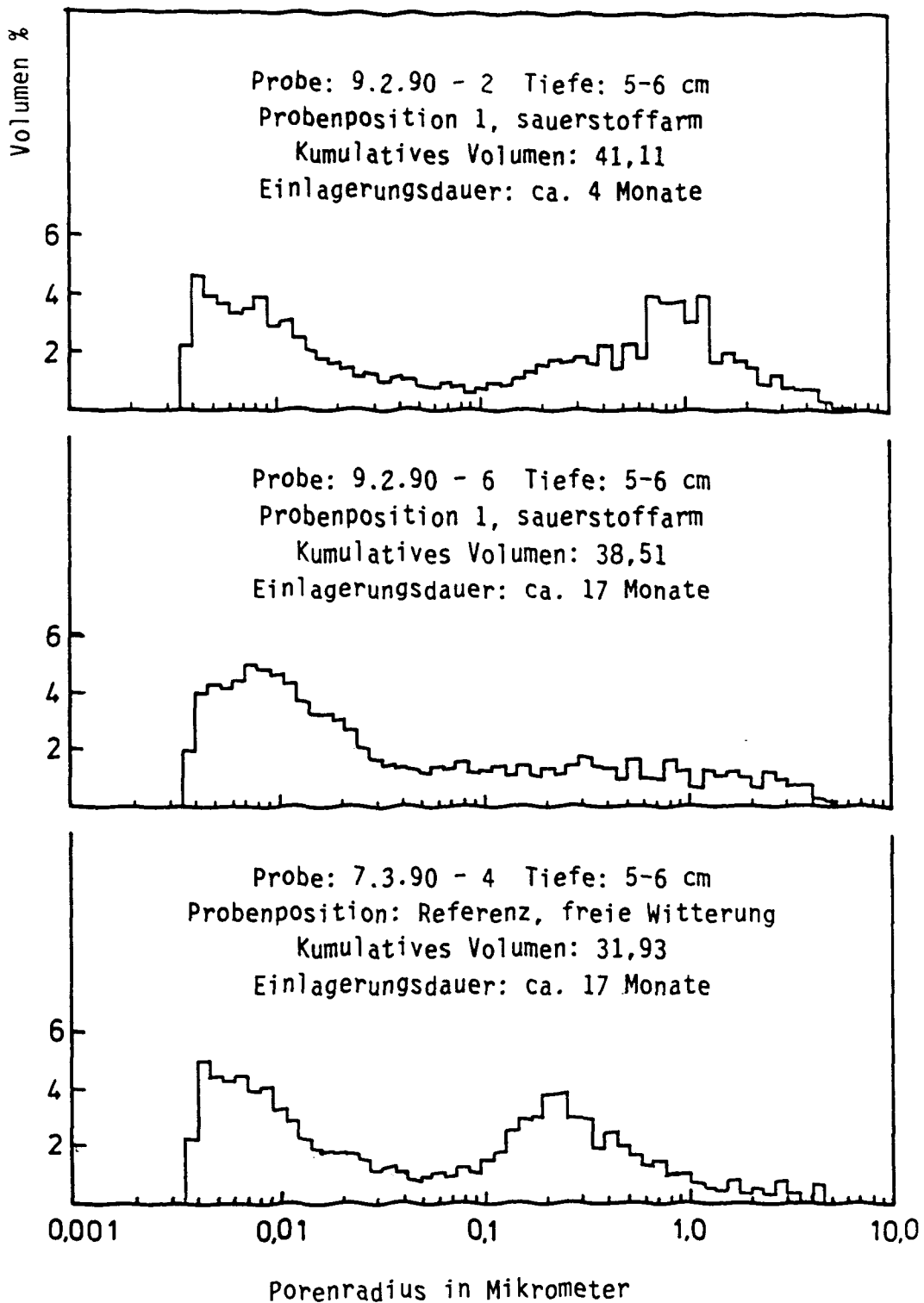


Abbildung 12: Porenradienverteilungen von Stahlbetonproben mit eingeprägtem Trennriß. Tiefe: 5-6 cm. Probenposition 1 (sauerstoffarm). Oben: Einlagerungsdauer 4 Monate, Mitte: Einlagerungsdauer 17 Monate, Unten: Referenzprobe, atmosphärisch bewittert.

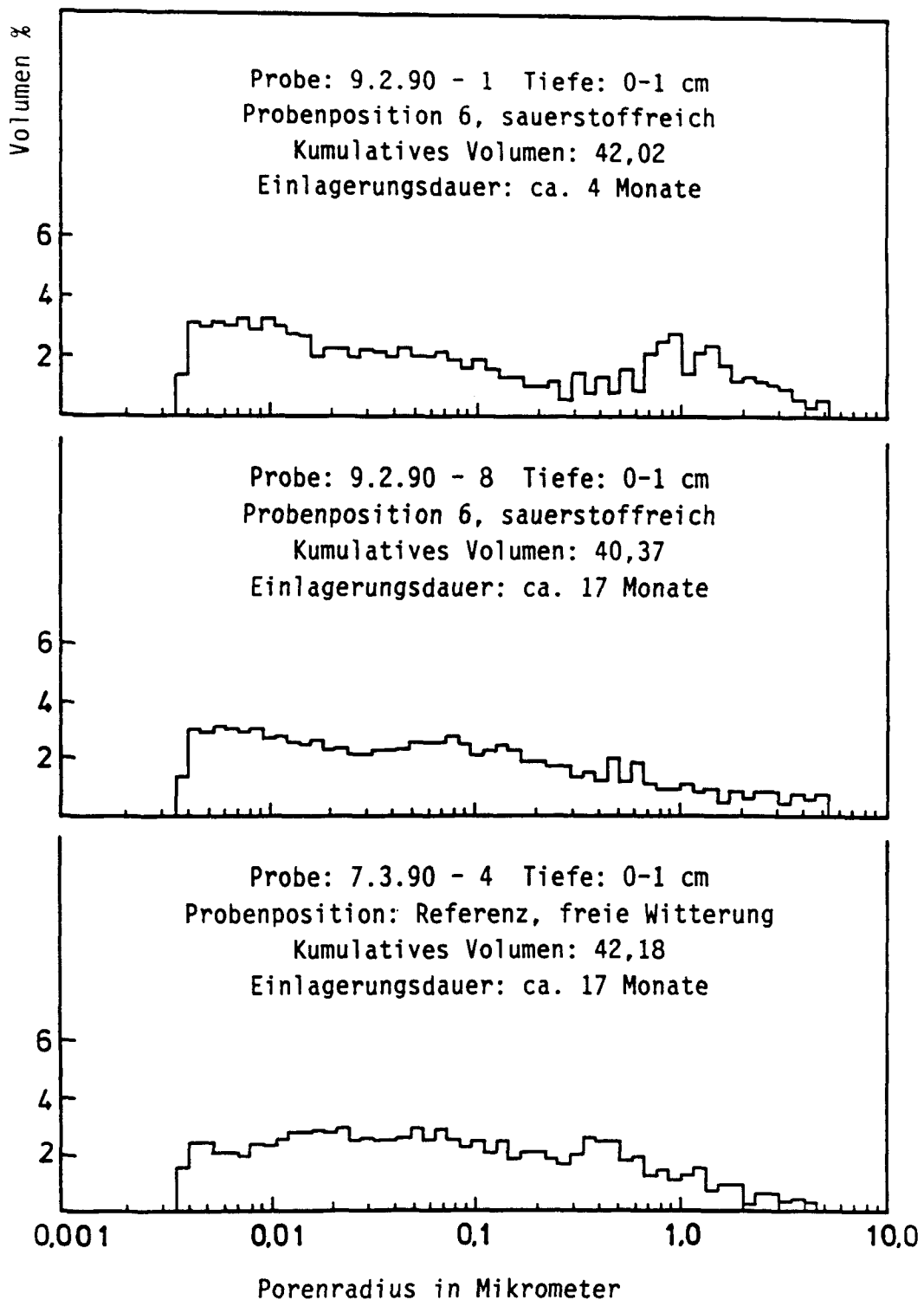


Abbildung 13: Porenradienverteilungen von Stahlbetonproben mit eingepprägtem Trennriß. Tiefe: 0-1 cm. Probenposition 6 (sauerstoffreich). Oben: Einlagerungsdauer 4 Monate, Mitte: Einlagerungsdauer 17 Monate, Unten: Referenzprobe, atmosphärisch bewittert.

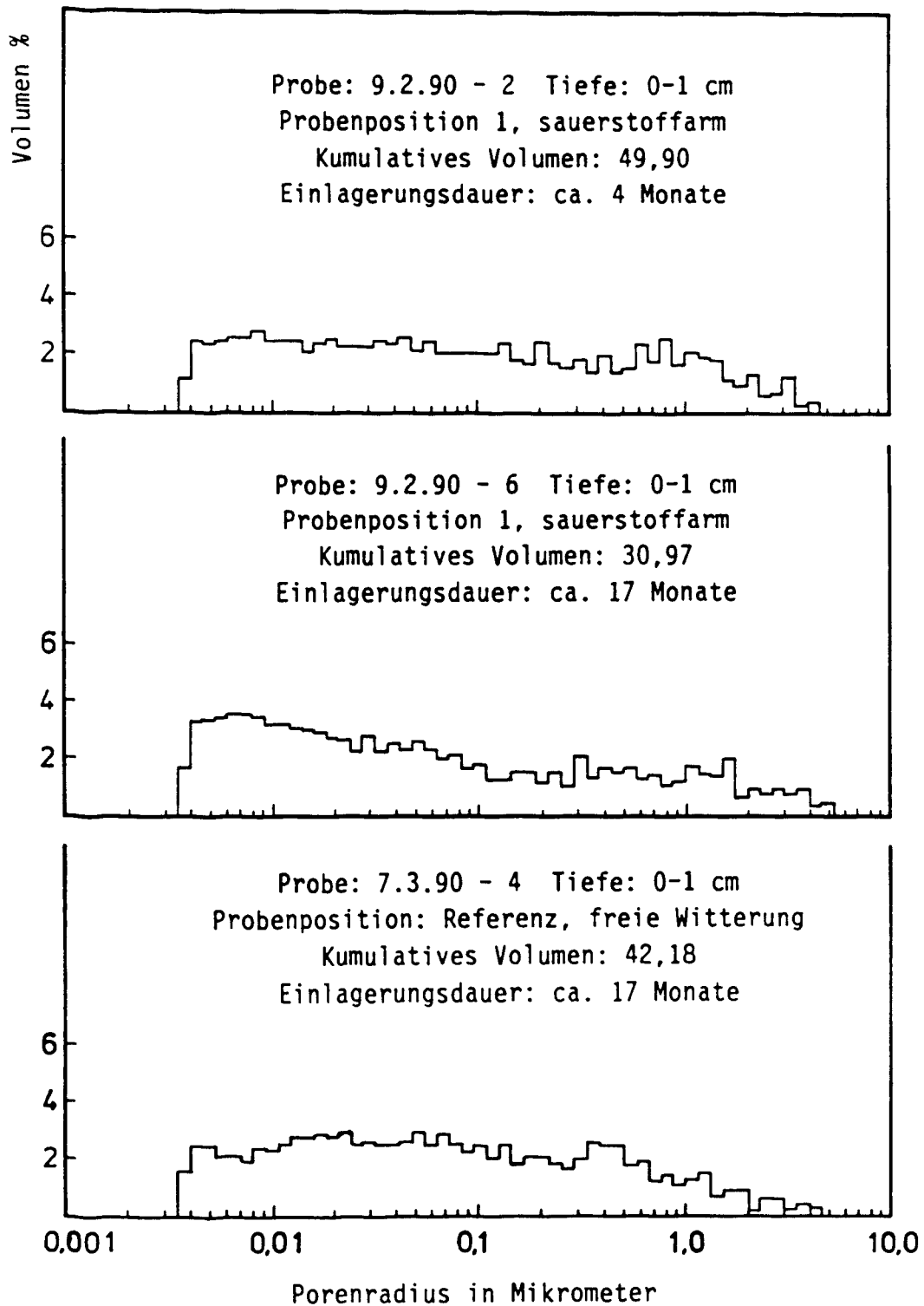


Abbildung 14: Porenradienverteilungen von Stahlbetonproben mit eingepprägtem Trennriß. Tiefe: 0-1 cm. Probenposition 1 (sauerstoffarm). Oben: Einlagerungsdauer 4 Monate, Mitte: Einlagerungsdauer 17 Monate, Unten: Referenzprobe, atmosphärisch bewittert.

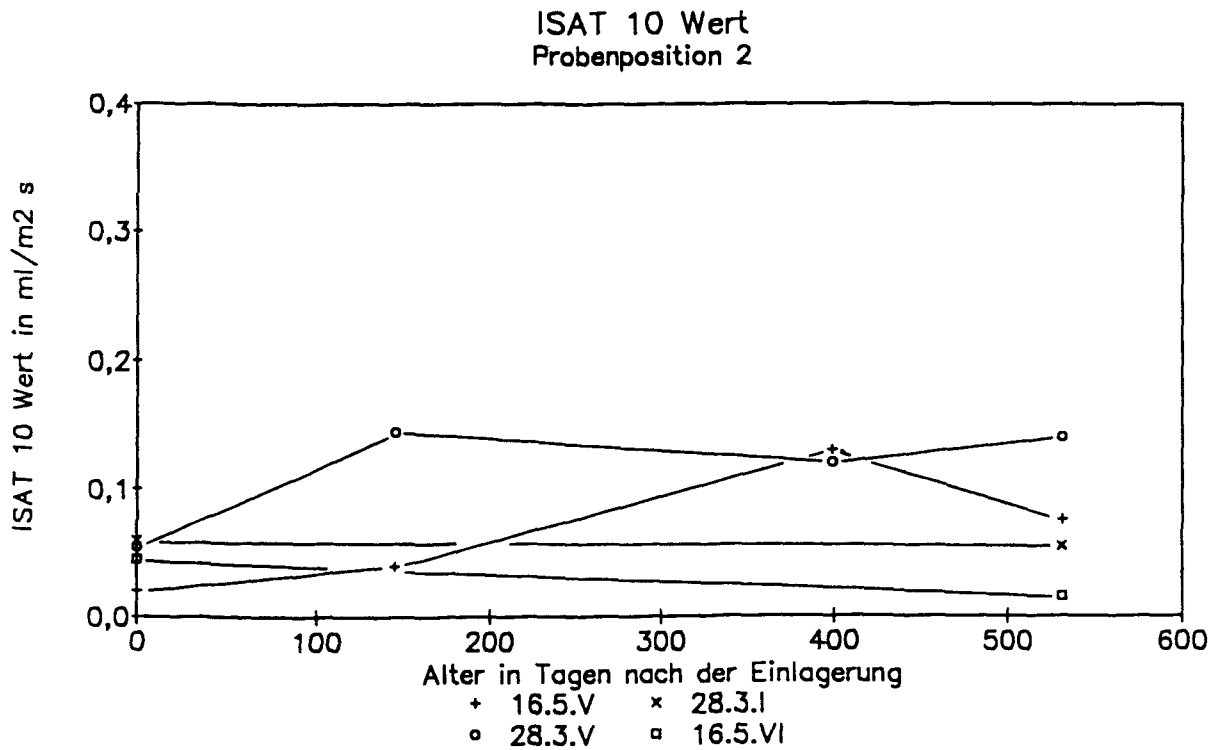
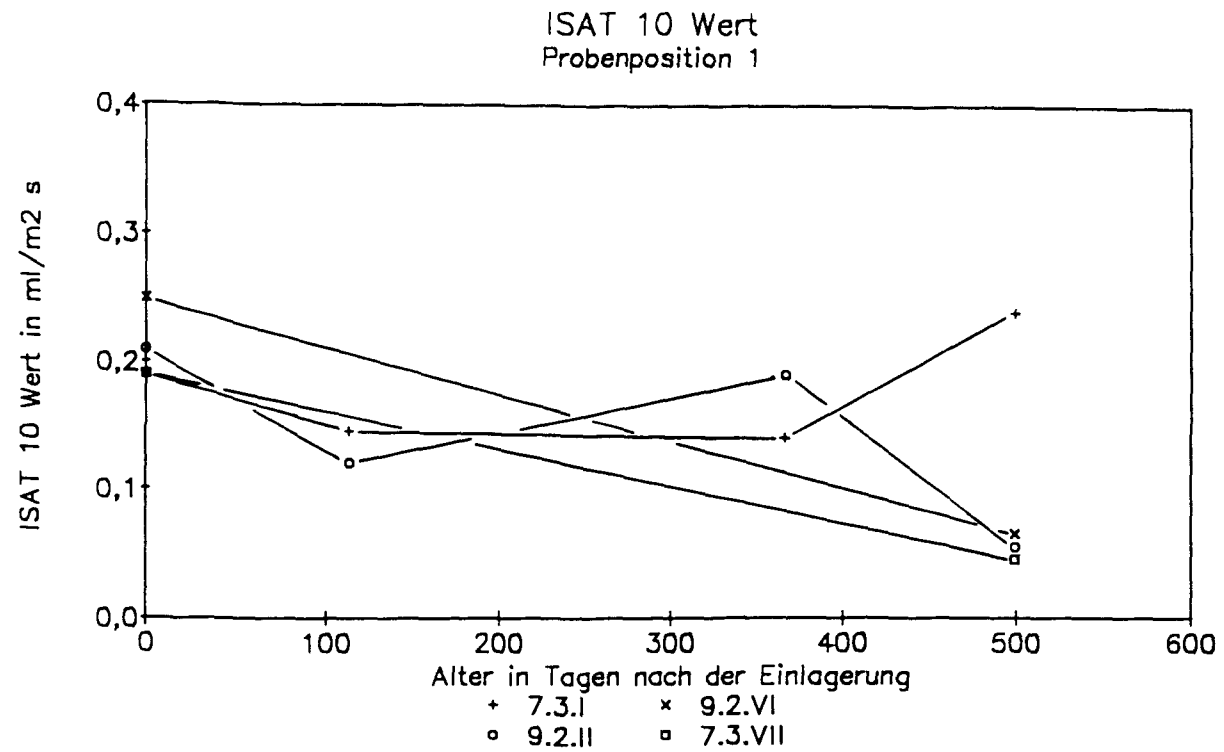
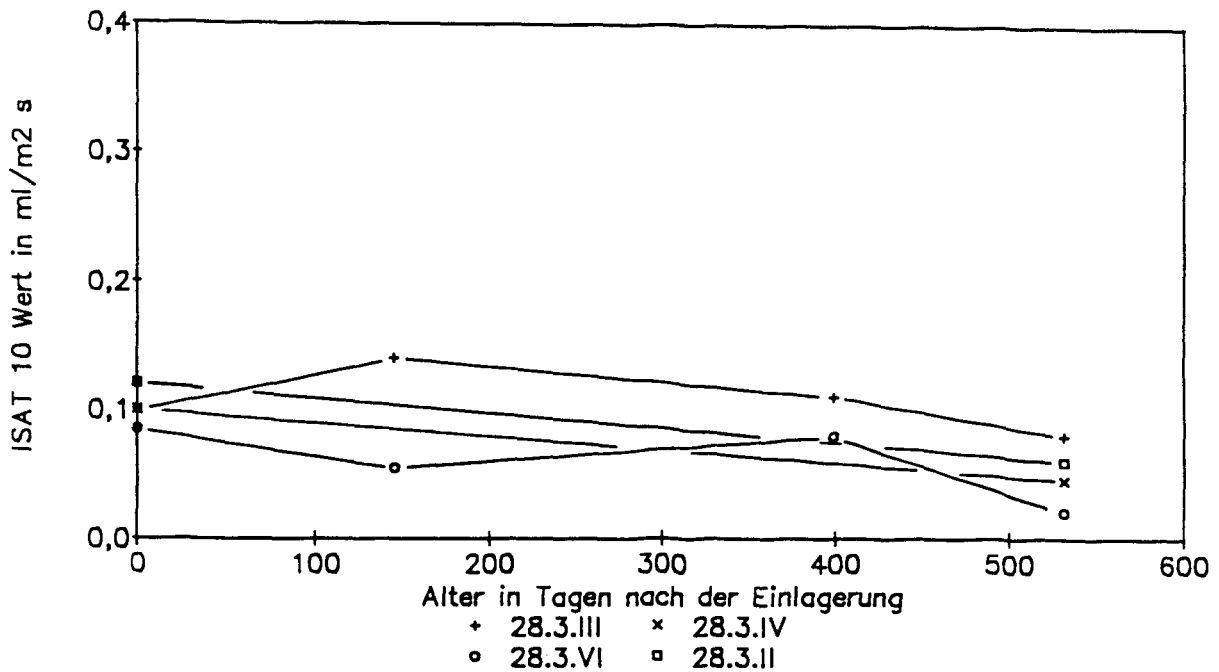


Abbildung 15: ISAT₁₀ Messungen der Stahlbetonkörper mit Trennriß als Funktion der Zeit. Oben: Probenposition 1. Unten: Probenposition 2.

ISAT 10 Wert
Probenposition 3



ISAT 10 Wert
Probenposition 4

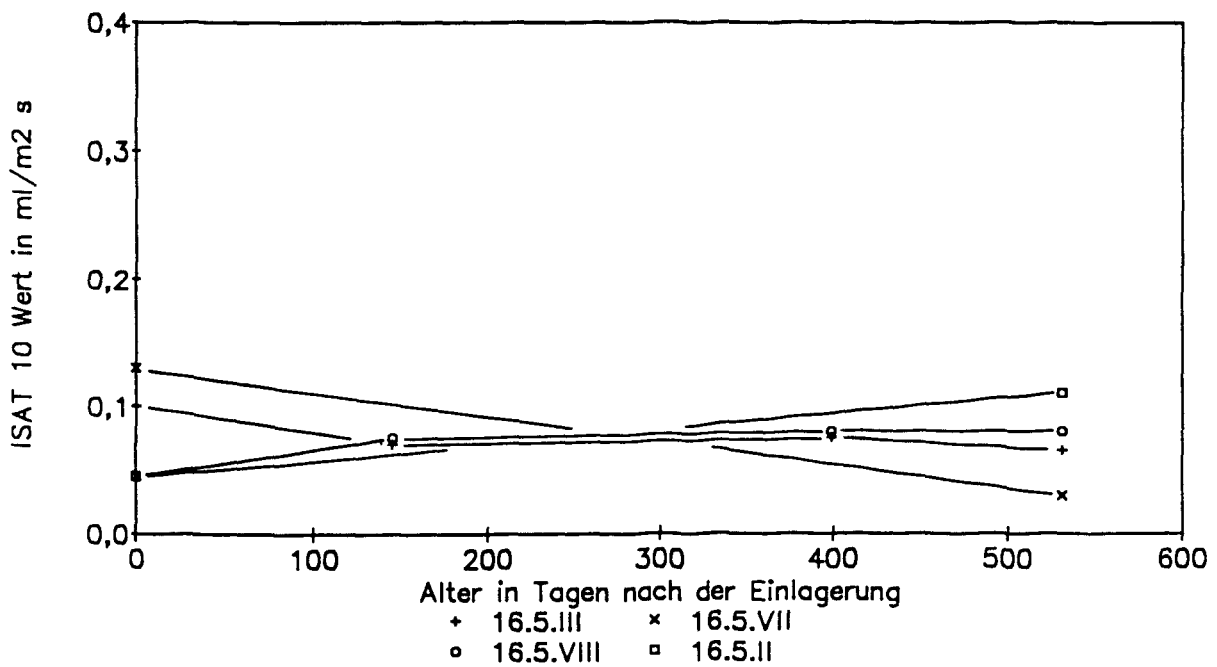


Abbildung 16: ISAT₁₀ Messungen der Stahlbetonkörper mit Trennriß als Funktion der Zeit. Oben: Probenposition 3. Unten: Probenposition 4.

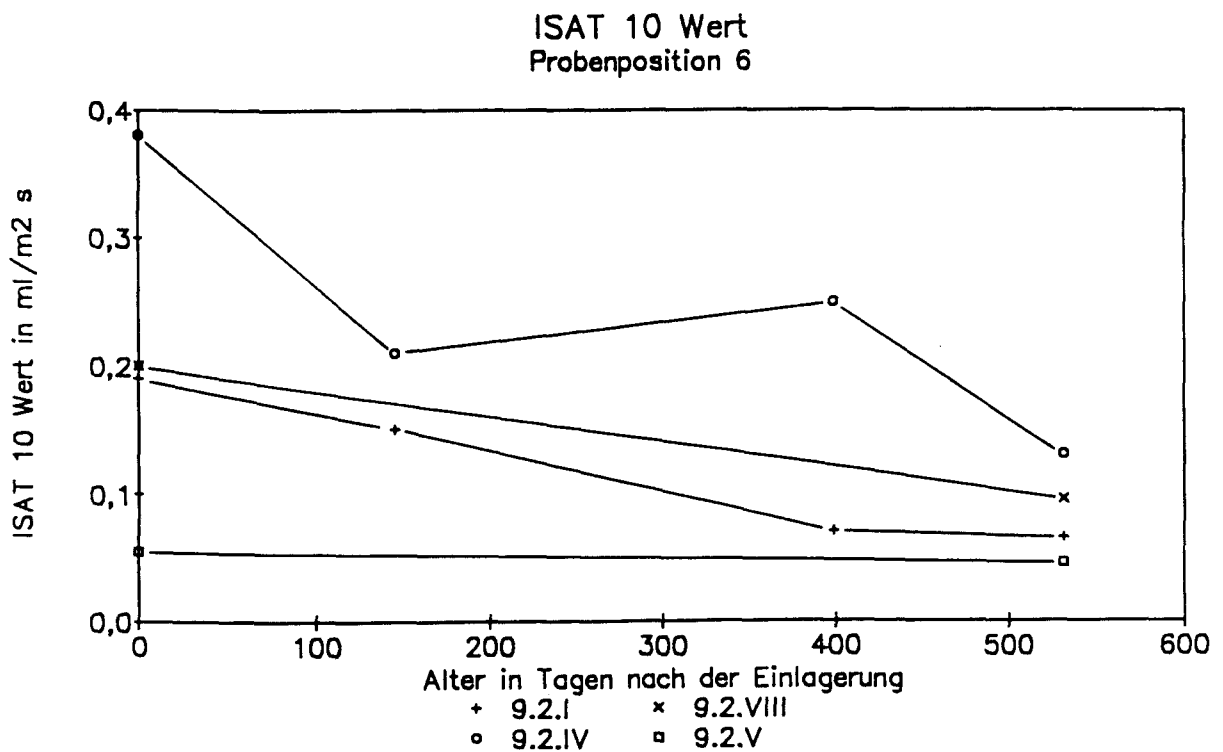
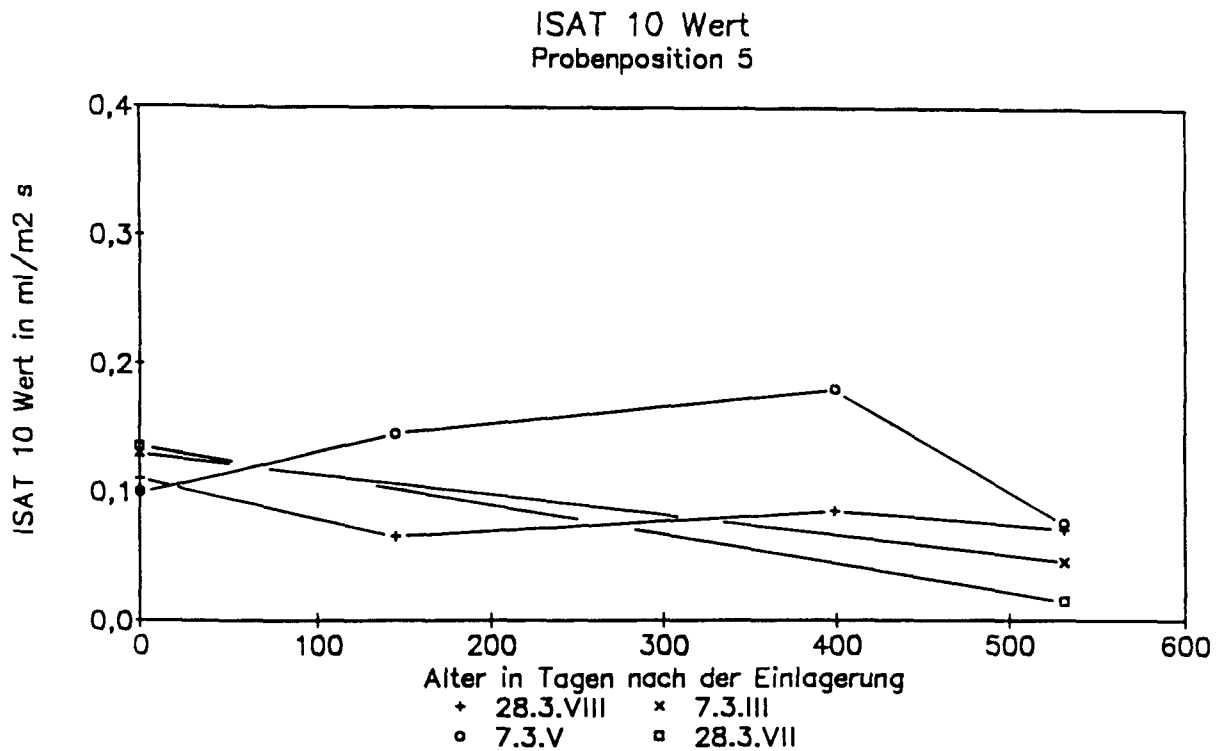


Abbildung 17: ISAT₁₀ Messungen der Stahlbetonkörper mit Trennriß als Funktion der Zeit. Oben: Probenposition 5. Unten: Probenposition 6.

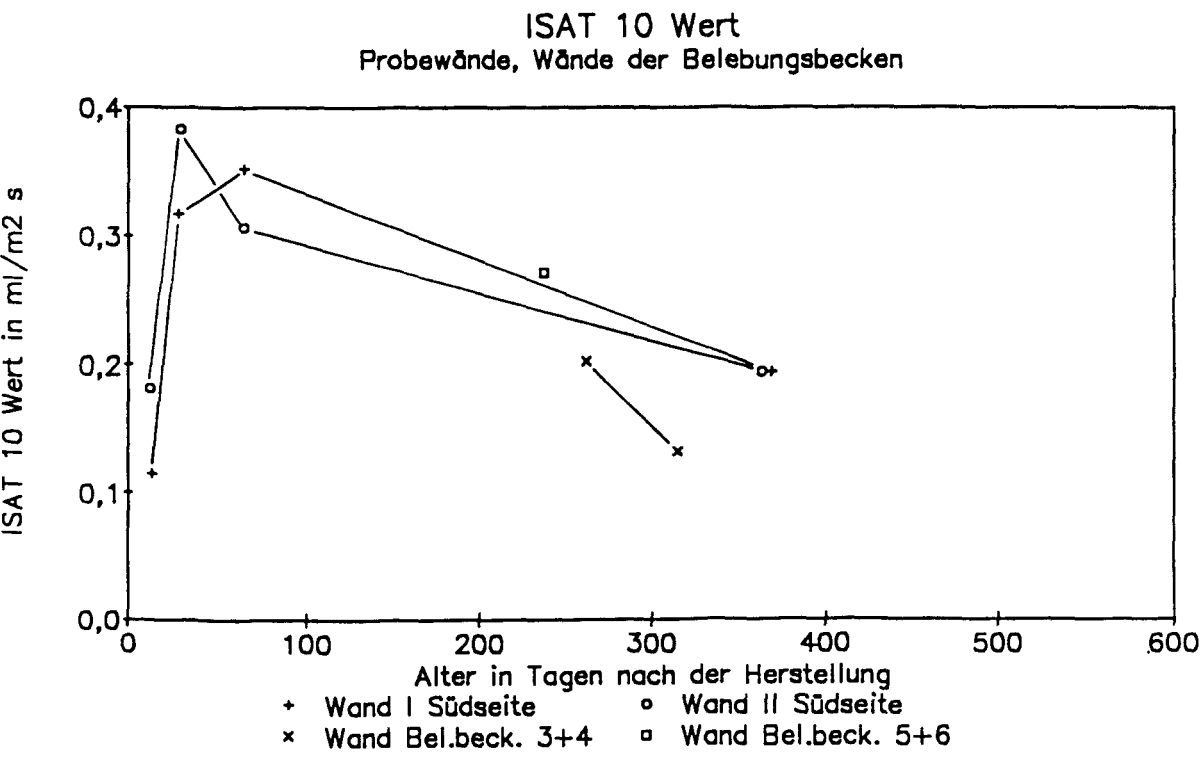
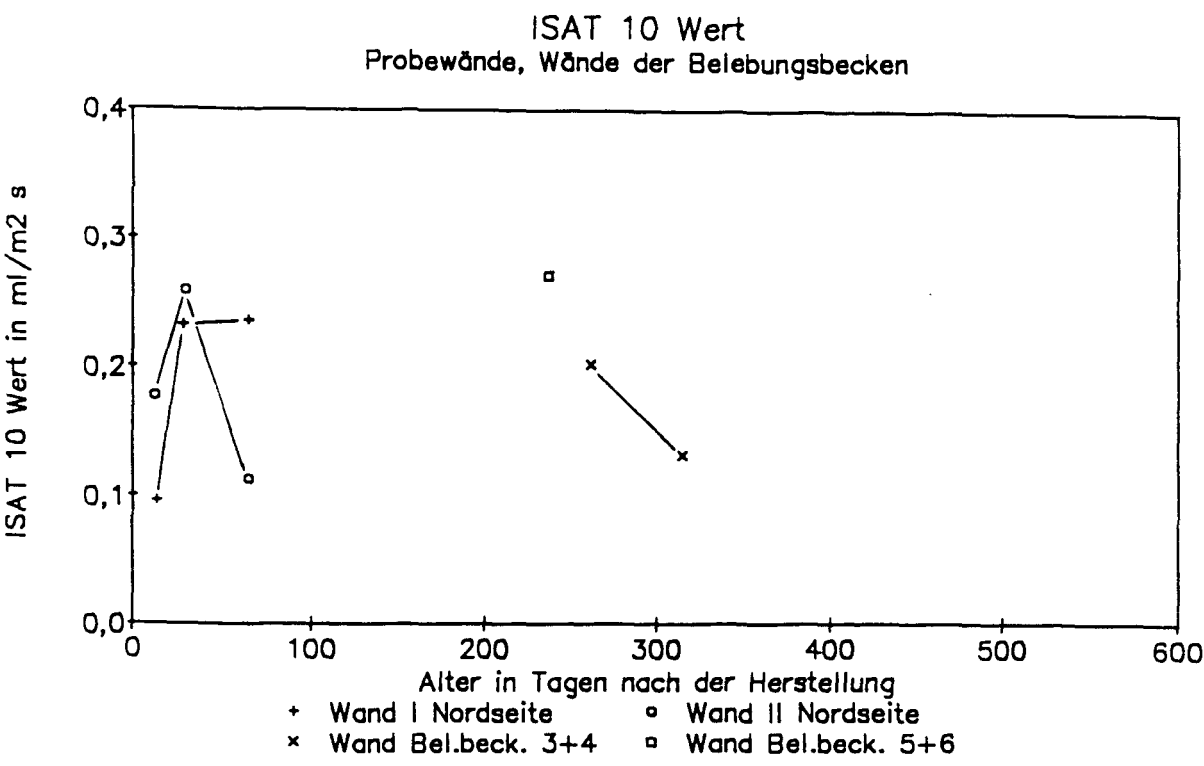
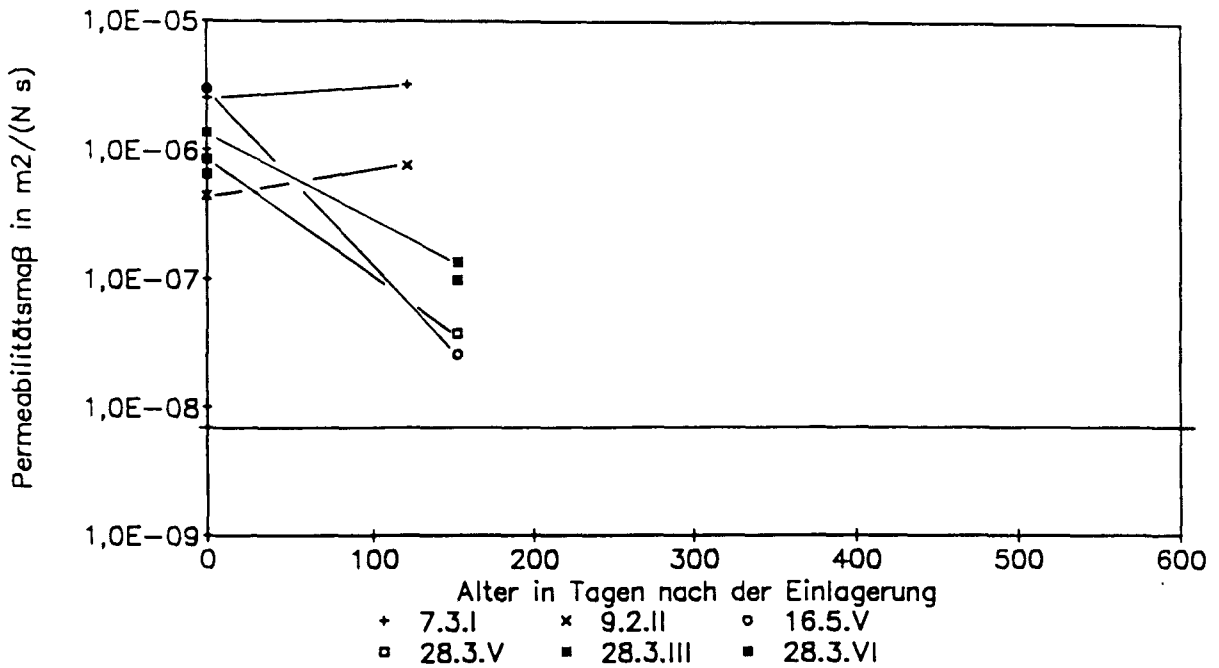


Abbildung 18: ISAT₁₀ Messungen der Probenwände I und II und verschiedener Wandabschnitte der neu erstellten Belebungsbecken als Funktion der Zeit. Oben: Nordseiten der Wände I und II. Unten: Südseiten der Wände I und II.

Permeabilität der Betonrandzone
Verfahren iBMB, Probenposition 1-3



Permeabilität der Betonrandzone
Verfahren iBMB, Probenposition 4

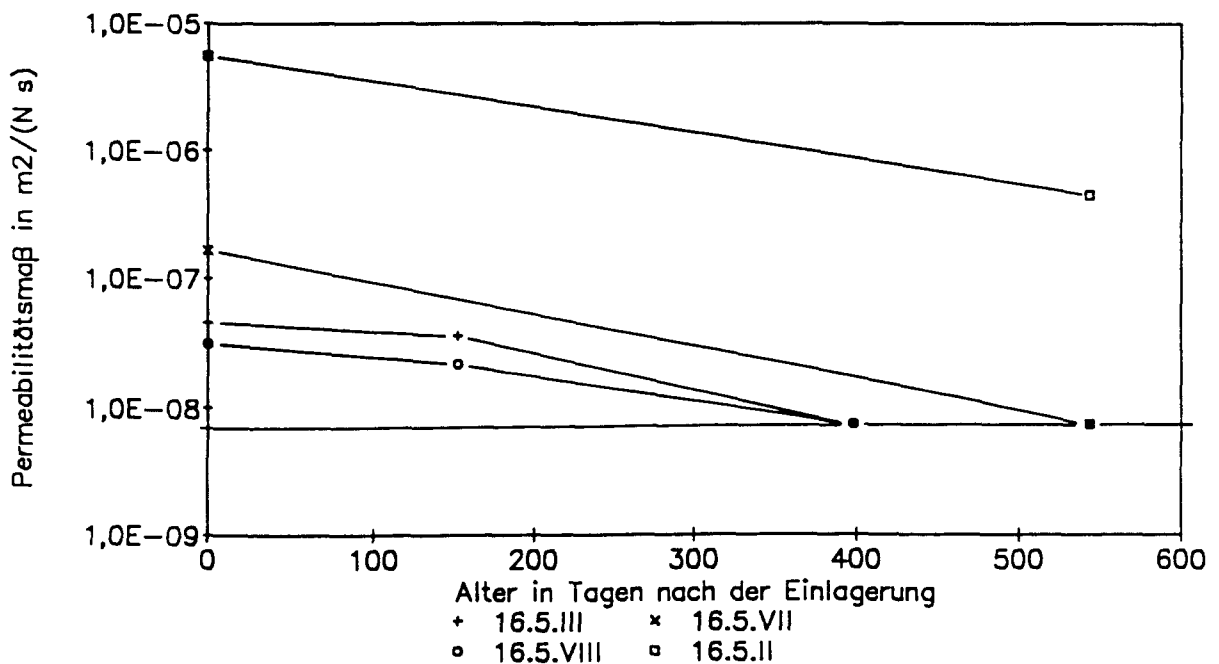
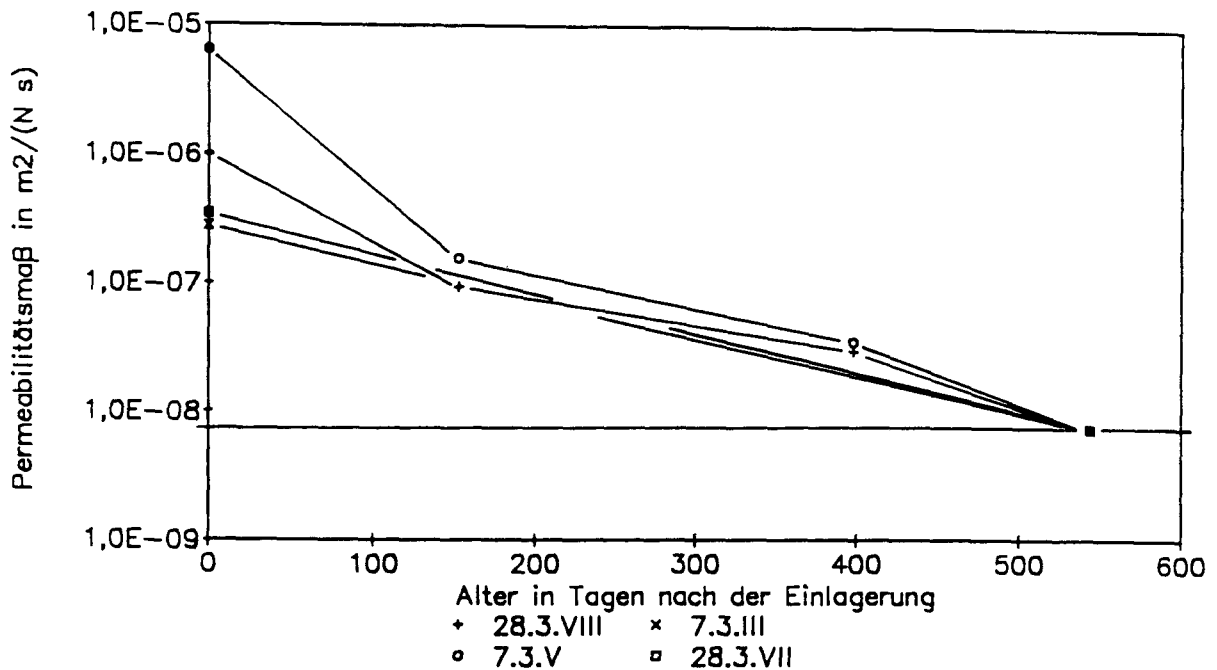


Abbildung 19: Messungen der Gaspermeabilität der Stahlbetonkörper mit Trennriß als Funktion der Zeit. Oben: Probenpositionen 1-3. Unten: Probenposition 4. Eingezeichnet ist auch die untere Meßgrenze der Apparatur (waagerechter Strich).

Permeabilität der Betonrandzone
Verfahren iBMB, Probenposition 5



Permeabilität der Betonrandzone
Verfahren iBMB, Probenposition 6

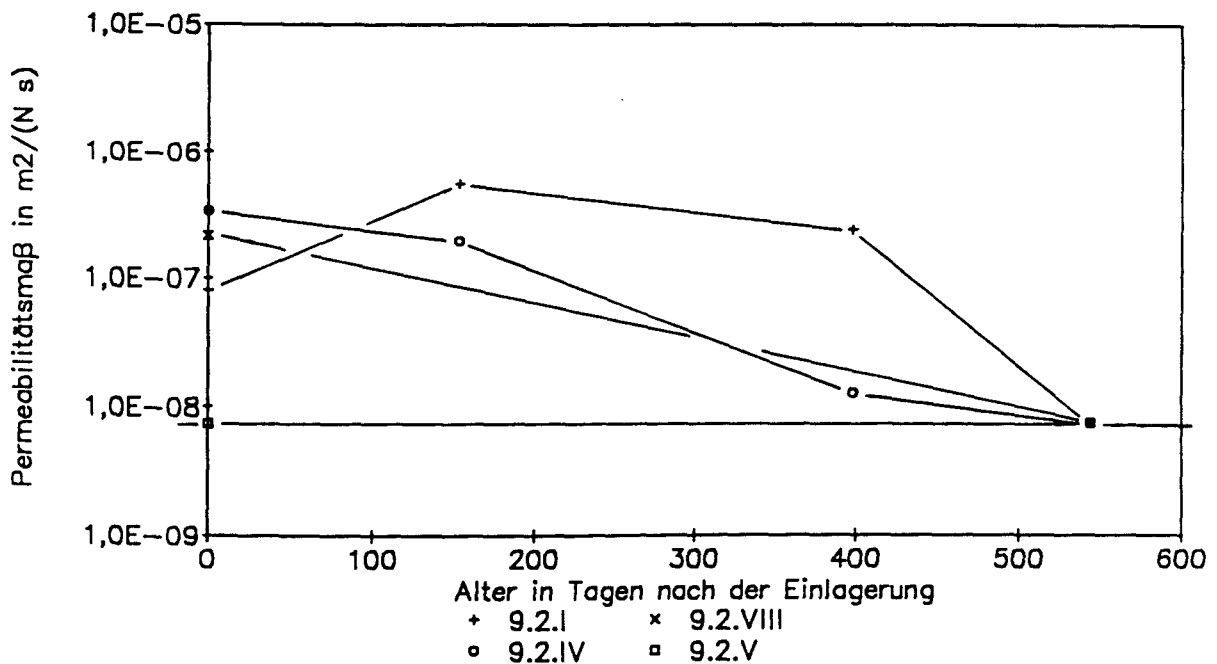


Abbildung 20: Messungen der Gaspermeabilität der Stahlbetonkörper mit Trennriß als Funktion der Zeit. Oben: Probenposition 5. Unten: Probenposition 6. Eingezeichnet ist auch die untere Meßgrenze der Apparatur (waagerechter Strich).



Abbildung 21: Korrosionserscheinungen an der Bewehrung der Stahlbetonkörper mit Trennriß im Rißbereich. Von Oben: Probe 7.3.90-3, Kennzeichnung 0 - keine Korrosion. Probe 7.3.90-7, Kennzeichnung X - Flugrost. Probe 9.2.90-1, Kennzeichnung XX - Korrosionsnarben.

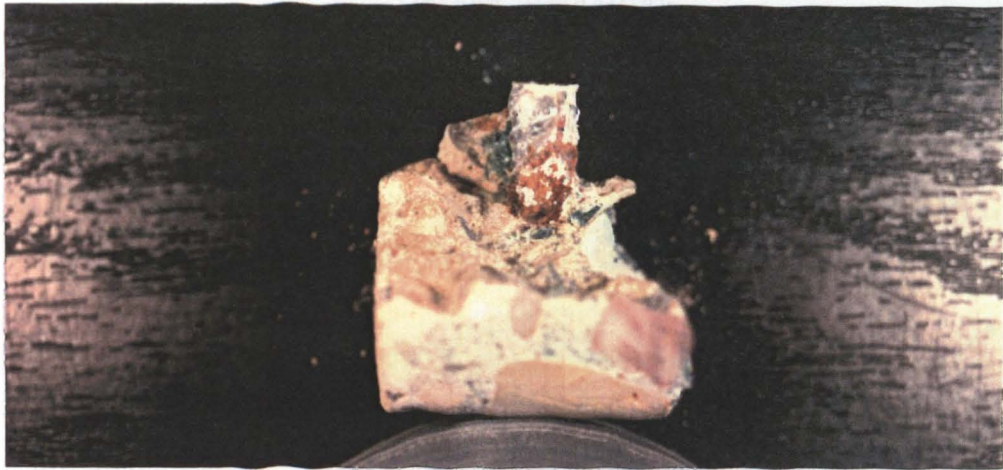


Abbildung 22: Korrosionserscheinungen an der Bewehrung der Stahlbetonkörper mit Trennriß im Rißbereich. Von Oben: Probe 9.2.90-4, Kennzeichnung XX - Korrosionsnarben. Probe 9.2.90-4, Kennzeichnung XX - Korrosionsnarben. Probe 28.3.90-7, Kennzeichnung XX - Korrosionsnarben.

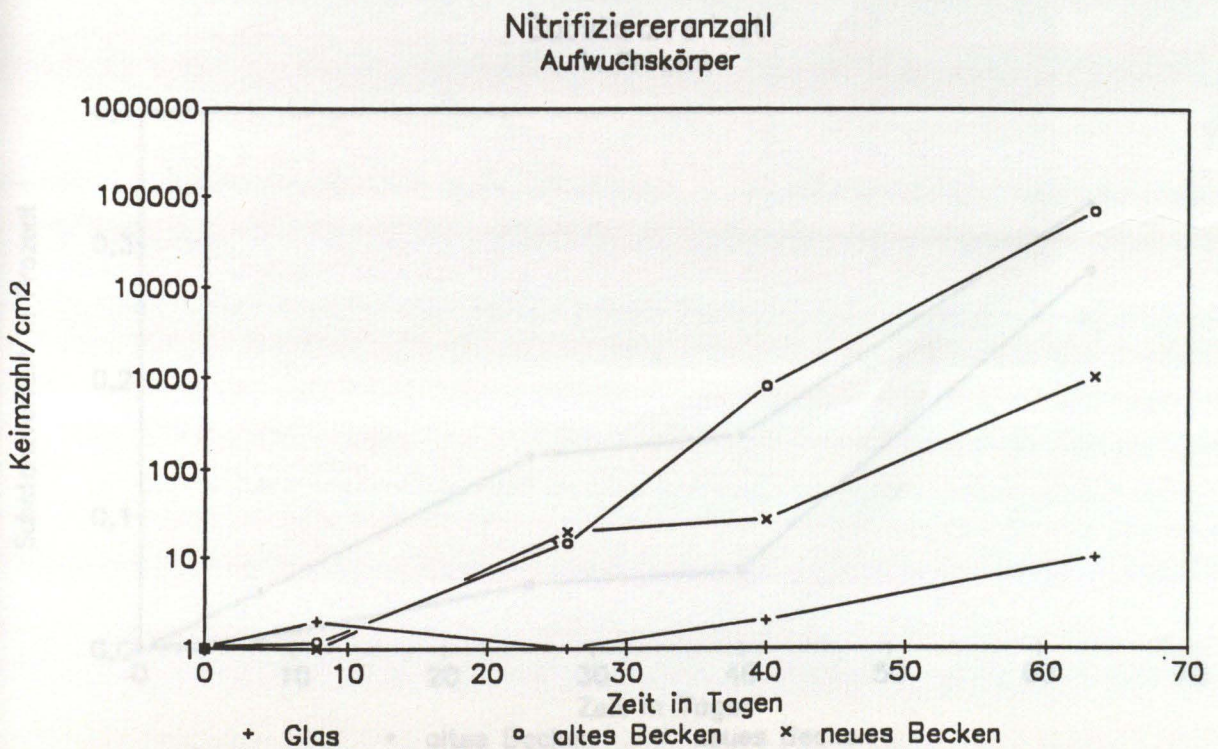
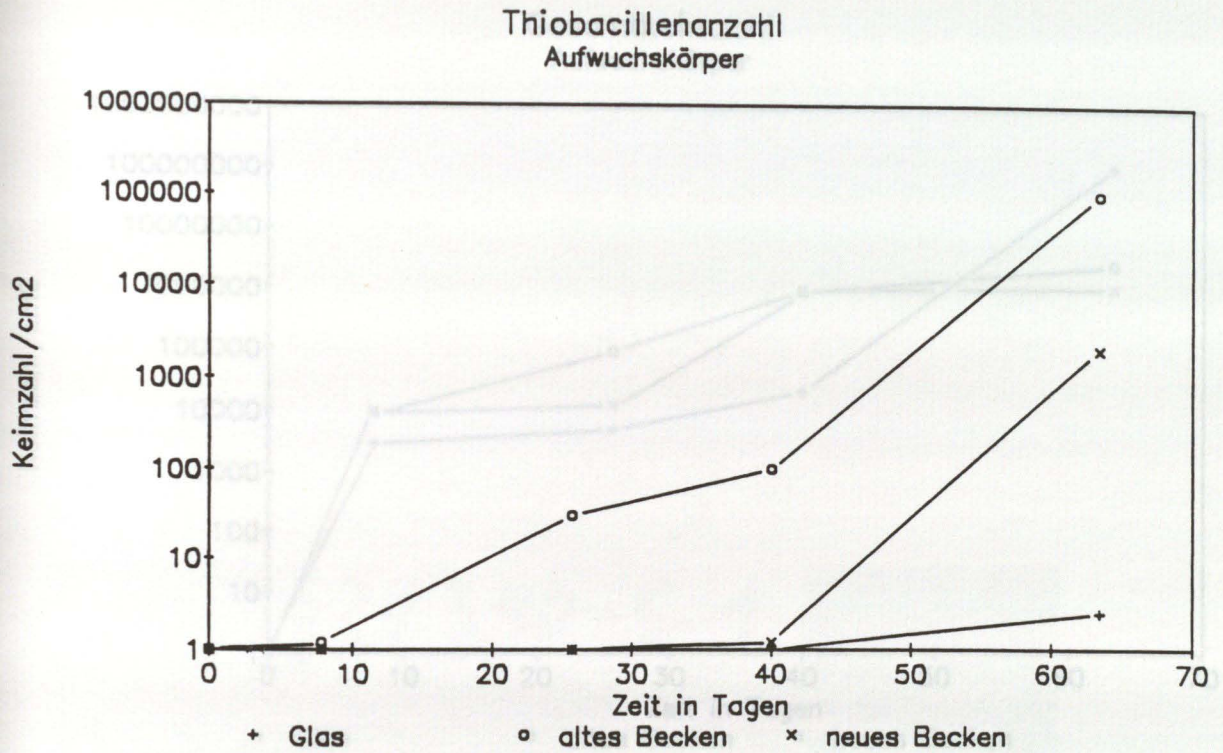


Abbildung 23: Oben: Logarithmische Darstellung der Thiobacillenanzahl auf den Aufwuchskörpern. Unten: Logarithmische Darstellung der Nitrifiziereranzahl auf den Aufwuchskörpern (umgezeichnet nach /12/).

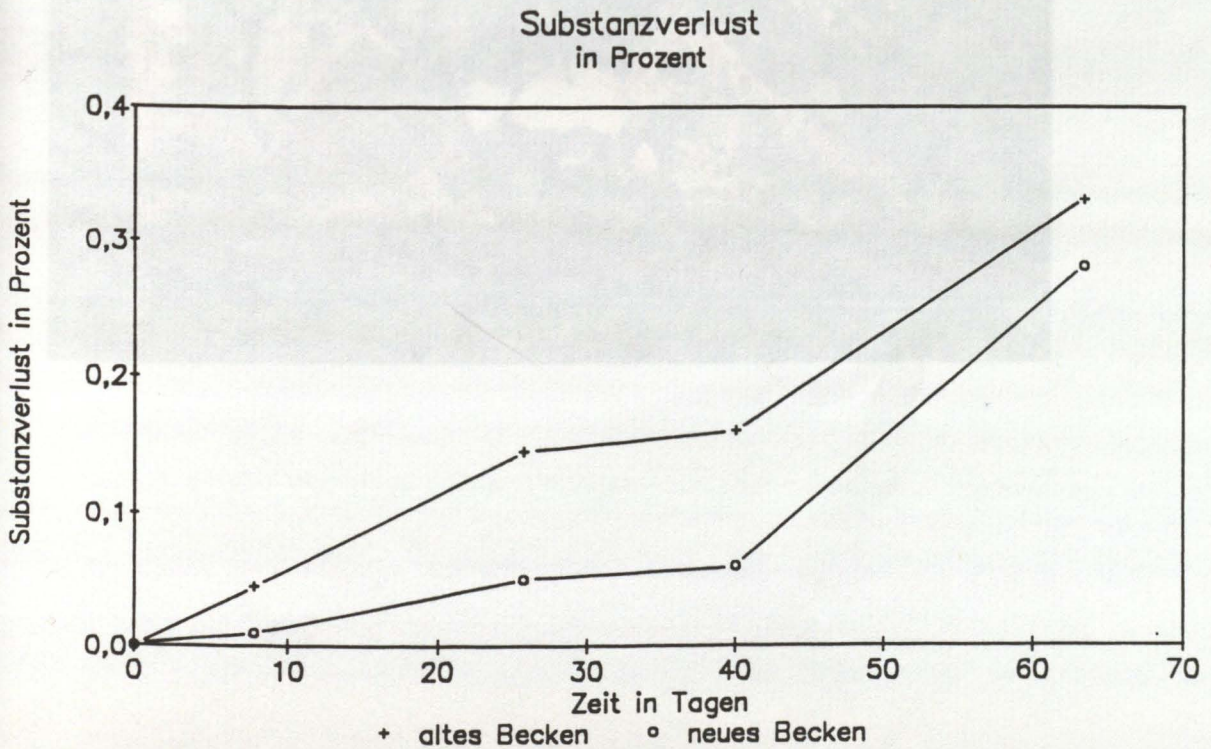
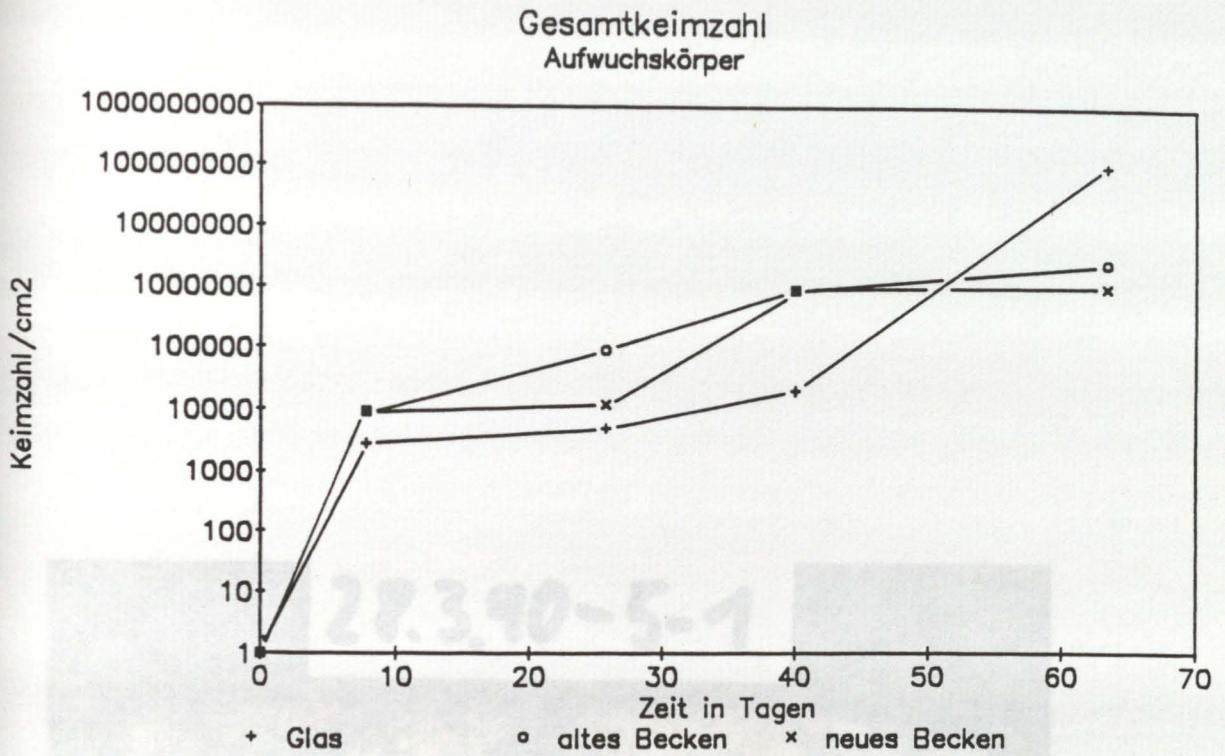


Abbildung 24: Oben: Logarithmische Darstellung der Gesamtkeimzahl auf den Aufwuchskörpern. Unten: Substanzverlust der Besiedlungskörper über den Versuchszeitraum (umgezeichnet nach /12/).



Abbildung 25: Gespaltener Bohrkern aus einer Stahlbetonprobe, die in das Belebungsbecken 5 eingehängt war. Schwarz markiert ist die Eindringtiefe des Abwassers.